



Research  
Green Chemical Engineering: Soft Materials—Review

## 材料、能源、机械工程中高效的电流变技术——从机理到应用

黄东阳<sup>a</sup>, 梁宇岱<sup>a,b</sup>, 周雪峰<sup>a</sup>, 汪子秋<sup>a</sup>, 时权<sup>a</sup>, 方雅莹<sup>c</sup>, 蒲华燕<sup>d</sup>, 张萌颖<sup>e,\*</sup>, 巫金波<sup>a,b,\*</sup>, 温维佳<sup>f,g,\*</sup>

<sup>a</sup> Materials Genome Institute, Shanghai University, Shanghai 200444, China

<sup>b</sup> Zhejiang Laboratory, Hangzhou 311100, China

<sup>c</sup> Fok Ying Tung Research Institute, The Hong Kong University of Science and Technology, Guangzhou 511458, China

<sup>d</sup> School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

<sup>e</sup> Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China

<sup>f</sup> Department of Physics, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China

<sup>g</sup> The Advanced Material Thrust, The Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 29 April 2021

Revised 3 November 2021

Accepted 25 January 2022

Available online 16 May 2022

#### 关键词

电流变效应

电流变液

电流变弹性体

胶体

软物质

### 摘要

电流变(ER)技术是一种基于电流变效应的先进技术。电流变技术中最常见的材料是电流变液(ERF)。电流变液是一种软物质智能材料,可以通过施加电场来可逆地调节其黏度。电流变液的衍生物,即一种新型的电响应软物质材料——电流变弹性体(ERE),由于其不沉降、易封装的优点也得到了越来越多的关注。电流变材料由于其可逆可调、快速响应、低能耗等特性在机械工程中有着广泛的应用。除了基础的电流变材料的合成和应用以外,电流变技术还应用在了能源材料制备、石油运输、储能等诸多领域。电流变技术在能源领域的应用为其在其他领域的潜在应用提供了一个很好的范例。本文结合最新的研究成果,从机理到应用,系统地综述了电流变技术在材料、能源和机械工程等领域的研究现状和未来发展前景。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

电流变(electrorheological, ER)技术是一种通过施加外部电场来控制介电悬浮液或胶体中分散相排列规则,从而改变材料的流变学、声学、光学等方面性能的技术[1–4]。ER技术具备能耗低、响应快(毫秒级)、转换过程可逆的优点[5]。可利用外部电场快速改变具备ER性能材料的微观结构和宏观性能[4]。ER技术是一种基于ER效应的先进技术。ER效应的发现及研究最早可追溯到1938

年,美国Colorado Springs公司的工程师Winslow在研究污染油的净化过程时,首次记录了“电黏度效应”[2,6]。1949年, Winslow尝试将几种不同的固体颗粒分散在绝缘油中,获得具备不同性能的电流变液(electrorheological fluid, ERF),并用“电纤维效应”一词来描述ER现象[6]。1972年, Luikov院士出版了第一部关于电流变学的著作《电流变效应》(Electrorheological Effect) [7],并将“电流变效应”一词引入科学界。ER效应是指在外加电场作用下,软物质材料微结构发生变化,如介电颗粒沿电场方向定向排列或聚集,宏观上表现为材料的流变学性能(如

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: zhang.my@t.shu.edu.cn (M. Zhang), jinbowu@t.shu.edu.cn (J. Wu), phwen@ust.hk (W. Wen).

黏度、剪切应力、剪切模量) 发生显著变化。经过在物理、化学和材料科学等领域的深入研究, 研究人员发现具备ER效应的材料在外加电场作用下, 不仅流变学性能发生明显改变, 材料的声学、光学和电学性能也会相应发生变化。之后对ER效应的研究主要以ERF为载体进行研究[1]。

在ER技术中, ERF是研究历史最长的一种ER响应的软物质材料[4]。在外加电场作用下, 其流变性能会发生显著且可逆的变化。在Winslow发现ER现象后的几十年里, 各种ERF相继出现, 然而较差的力学性能限制了ERF的工程应用。直到2003年, Wen等[8]发明了屈服强度高达130 kPa的巨电流变液 (giant electrorheological fluid, GERF), ERF由此进入了一个蓬勃发展的时代。由于ERF能耗低、响应速度快等优点, 其在工程领域受到众多研究者的青睐。ERF已被应用于微流控技术、阻尼器、执行器[9-10]、柔性机器人、制动器、减震系统和人体肌肉[11-12]等众多工程领域。虽然ERF应用领域广泛, 但其抗沉降稳定性、温度稳定性、材料可持续性和安全性仍有待提高。首先由于ERF是由微纳米颗粒和绝缘连续相组成的悬浮液, 颗粒易发生聚集和沉淀, 导致其稳定性较差。其次对于屈服强度较高的ERF, 分散相中含有一定量的吸附水, 导致ERF在某些实际应用中出现温度不稳定和安全性隐患[13]。不过, 通过对连续相[14]、分散相[15-17]的研究以及添加剂的使用[18], 研究人员在这些问题上已经取得了一些突破。

电流变弹性体 (electrorheological elastomer, ERE) 是另一种新型的ER材料, 具有类似于ERF的ER效应, 即它们的黏弹性随外加电场强度的变化而变化[19-20]。ERE的组成通常包括连续相、分散相、添加剂和其他部件, 它们对弹性体的性能有决定性的影响。ERE是ERF的衍生物, 克服了ERF的易沉淀和难封装等缺点, 相比于ERF, 未来在工程应用中具有更好的前景。然而, 由于低储能模量和低ER效应, ERE还远未达到工业应用的最低阈值要求, 目前对ERE的研究仍主要聚焦在其材料性能的提高上。此外, 无论是ER材料研发还是工程应用研究, 仍存在许多亟需解决的问题。例如, ER材料的力学性能、稳定性、抗疲劳性能和温度适应性都有待提升, 工程应用中的材料封装、电极制备和高安全性等仍面临挑战。

ERF和ERE都是基于ER效应的ER材料, 利用其在有外加电场下流变学性能的变化来制造智能器件, 是一种比较主流且传统的研究思路。随着ER效应研究的深度与宽度的扩展, 研究人员利用ER效应直接改变一些材料

的性能, 得到了各种加成的效果, 快速推进ER技术在其他领域的应用。根据ER效应的原理, 只要处于悬浮状态的悬浮液、胶体或材料中含有介电颗粒, 施加电场后, 介电颗粒就会沿电场方向聚集或呈链状、柱状排列, 故可通过微控制等方法来改变这些材料的微观形态, 达成某些性能变化。例如, 在原油输送过程中[21], 由于原油中含有一定量的介电微纳米颗粒, 这些颗粒在外加电场的作用下会结块或形成链状结构, 从而表现出宏观上的降黏效应。此外, 该技术还用于食品加工[22]和能源材料制备[23]。特别是在能源领域, ER技术成功地降低了能源消耗, 提高了原油输送效率[24]。此外, 该方法还可用于制备储能材料[25]。ER技术的发展打破了限制ERF的应用的僵局, 扩大了该技术的研究广度和应用范围, 这对ER领域的发展变化具有重要意义。

在本文发表之前, 已有许多科研人员对ER技术进行综述。例如, Sheng和Wen [3]总结了ERF相关理论, Dong等[4]报道了ERF的研究进展, Wu等[5]和Zhang等[26]发表了ERF在微流控中的应用, Dong等[19]报道了ERE的研究进展。虽然这些综述很好地总结了ER技术的部分内容, 但在ER技术领域还没有一个全面的报道。本文以ER技术为主题, 系统地描述了ER理论和ER材料的发展及其在各个领域的应用, 而不是局限于单一领域(图1)。本文还结合最新的研究成果, 总结并展望了ER技术未来的发展方向和前景。

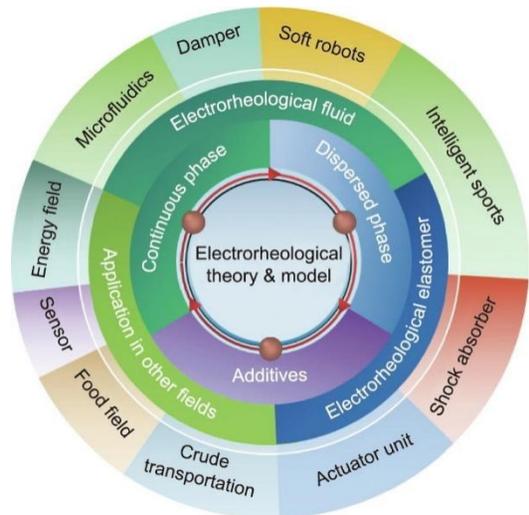


图1. 电流变技术构成框架图。

## 2. 电流变液

目前对ERF材料的研究主要集中在材料分散相的材

料类型选择、颗粒制备、几何形状设计研究等方面。近年来连续相的研究也受到了广泛的关注，特别是本文提出的二元液相（binary-liquid-phase, BLP）ERF模型，对提高ERF的稳定性具有重要意义。添加剂的使用目的是改进现有的ERF，以达到某项或全面的性能提高。本章将介绍ERF基础理论和模型的发展，分散相、连续相及添加剂的研究，以及ERF的应用。

## 2.1. 理论

ER效应的一般过程如下[27]：ER颗粒在外电场作用下发生极化，形成偶极子，具有偶极矩的颗粒产生定向排列，使颗粒从无序状态变为有序状态，形成链状或柱状结构，进而对外部呈现ER效应。由于ERF是具有复杂成分的悬浮液，ER效应的成因和理论也比较复杂。目前，大多数科研人员认为，颗粒的极化是造成ER效应的主要原因。

自发现ERF以来，出现了许多相关理论（表1）[6,8,14,28–34]。Winslow [6]在1949年提出了电纤维理论，Klass和Martinek [28]在1967年提出了双电层极化理论。1983年，Stangroom [29]提出了“水桥”理论。然而，纤维理论无法解释纤维形成的缓慢速率和ER效应毫秒级响应时间的差异，而“水桥”模型和双电层极化理论只能解释含水ERF的ER效应。目前得到的普遍认可的理论有介电理论、极性分子取向成键理论、饱和极化模型和饱和取

向极化模型。

根据介电理论[30]，由于ER颗粒的介电常数较大，在外加电场（ $E$ ）的作用下会发生感应极化，颗粒的正电荷和负电荷分别向负极和正极移动，形成偶极子。由于静电力的作用，分散相中相邻的偶极子相互吸引，使颗粒形成链状结构。随着电场强度的增加，颗粒的极化程度增加，更多的颗粒形成柱状结构，这种结构比链状结构更强（图2）。因此，从宏观性质上讲，ERF的流变特性随着外加电场强度的变化而变化。

在电场作用下极化颗粒间的力学关系可以被近似地描述为电偶极子。在外加电场方向上，颗粒间的极化强度 $p$ 和相邻颗粒间的吸引力 $f$ 分别为

$$p = 4\pi\epsilon_0 R^3 E \epsilon_f \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f} \quad (1)$$

$$f = \frac{\epsilon_0 \epsilon_f \beta^2 R^6 (6D - 4R) E^2}{D^4 \left[ D - 2R\beta^{\frac{1-\beta}{2}} \right]} \quad (2)$$

式中， $\beta = (\epsilon_p - \epsilon_f) / (\epsilon_p + 2\epsilon_f)$ 为分散相颗粒与连续相液体之间的介电适应因子； $R$ 为颗粒半径； $D$ 为相邻颗粒中心之间的距离； $\epsilon_p$ 、 $\epsilon_f$ 、 $\epsilon_0$ 分别为颗粒、液相和真空的介电常数。

在电场作用下极化颗粒之间的力学关系可以被近似地描述为电偶极子。然而，介电型ERF屈服强度的理论极

表1 ERF理论模型及其ER特性

Theory and model	Year of invention	Inclusion of polar molecules	Yield stress (5 kV·mm <sup>-1</sup> )	Current density (5 kV·mm <sup>-1</sup> )	ER efficiency	Refs.
Fiber theory	1949	Yes (water)	Low	High	—	[6]
Double layer polarization theory	1967	Yes (water)	Low	High	—	[28]
“Water bridge” theory	1983	Yes (water)	Low	High	—	[29]
Dielectric theory	—	No	< 10 kPa	Low	—	[30–31]
Surface polarization saturation model	2003	Yes (urea)	130–250 kPa	50–100 μA·cm <sup>-2</sup>	3 800–25 000	[8]
Polar molecule orientation and bonding model	2007	Yes (urea or others)	200 kPa	1.2–200 μA·cm <sup>-2</sup>	1 200–62 000	[14,32–33]
Saturated orientational polarization model	2009	Yes (urea)	130 kPa	50–100 μA·cm <sup>-2</sup>	—	[34]

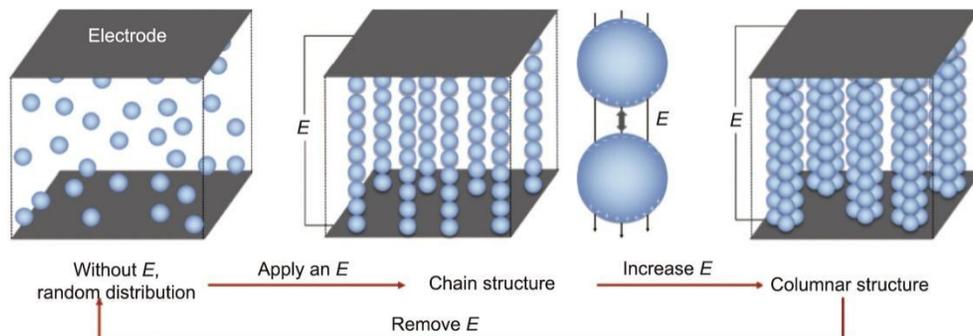


图2. 介电理论模型。E：外部电场。

限约为 10 kPa [31], 因此介电理论并不适用于高屈服强度的 ERF。一段时期内, 对 ERF 的研究一直处于停滞状态, 直到 2003 年 Wen 等[8]制备了静屈服强度为 130 kPa 的 GERF。除了具有超高强度和更快的响应时间外, GERF 还可以在较宽的温度范围内以较低的电流密度工作。介质极化理论无法解释其机理[3]。因此, Wen 等[8]提出了一种新的理论来解释巨电流变效应, 即表面饱和和极化模型。

表面饱和和极化模型认为 GER 纳米颗粒在外加电场作用下发生极化。由于静电力的作用, 颗粒沿电场方向排列成有序的链状结构。当电场强度增大到一定值时, 相邻两个球体之间会形成饱和和极化层, 如图 3 (a) [8]所示。饱和和极化层的存在及其相互作用提高了颗粒组成的柱状结构的稳定性, 从而使 GERF 具有较高的屈服强度。基于该模型, 采用数值模拟方法, 得到了相邻颗粒的静电场能和弹性相互作用能。利用这两个能量值, 即可计算出相应电场作用下的抗剪强度, 计算结果与实验结果高度吻合。表面极化饱和模型很好地解释了 GERF 的机理。

之后出现一系列极性分子修饰的  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Sr-Ti-O}$  和  $\text{Ca-Ti-O}$  颗粒, 由其制备的 ERF 屈服强度高达 200 kPa [32]。与尿素包覆的纳米颗粒不同, 这些极性分子主导的 ERF 无法采用饱和和极化模型进行解释。2007 年, Shen 等[33]建立了极性分子取向成键模型[图 3 (b)], 用于解释这些极性分子型电流变流体 (polar-molecular electrorheological fluid, PM-ERF)。该理论主要内容为: 在外加电场的作用下, 介电颗粒会形成偶极子, 在静电力的作用下, 相邻的颗粒会形成链状排列。相邻颗粒之间的偶极子端对端相连, 形成一个比外加电场大得多的局部电场  $E_{\text{loc}}$  (约  $10^9 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ )。  $E_{\text{loc}}$  促进颗粒表面极性分子沿电场方向的极化。在此过程中, 分子间的偶极-偶极相互作用 ( $f_{m-m}$ ) 远大于极性分子间的偶极-电荷相互作用和来自颗粒的极化电荷 ( $f_{m-e}$ )。因此, 前者是造成极性分子主导 ER 效应的主要原因。极性分子取向成键理论目前适用于大多数具有

高屈服强度的 ERF。

2009 年, Tan 等[34]将表面饱和和极化模型与极性分子取向成键模型相结合, 提出了饱和取向极化模型。该模型表明, GER 颗粒由高介电常数的核和极性分子层组成[图 3 (c)]。所述极性分子壳层被进一步分为内层和外层, 它可以是尿素包覆层、极性分子或极性基团。离子存在于介电核表面, 并与极性分子相互作用, 形成极性分子壳。用有限元法计算的结果表明, 极性分子外层的电场强度比内层强得多。两个颗粒之间的局部电场强度极高, 保证了颗粒的外极性分子可以被极化和取向。因此, 外极性分子的饱和和取向极化是电场作用下颗粒间强烈相互作用的主要原因[34]。该模型丰富了 GERF 理论, 更全面地描述了 GERF 具有高力学性能的原因。基于该模型, 研究者还提出了由涂层越薄、粒径越小的颗粒制备而成的 ERF 具有更强的 ER 效应。

## 2.2. 流体模型

ERF 在没有电场的情况下表现出类似牛顿流体的行为, 电场的作用会导致其从液态到固态的转变, 可利用 Bingham 流体模型来描述 ERF 的这种流体性质。Bingham 模型中包含两个参数, 分别是屈服应力  $\tau_0$  和零场黏度  $\eta_0$ 。当剪切应力达到一定阈值后, 流体开始流动, 其剪切应力 ( $\tau$ ) 和剪切变形速率 ( $\dot{\gamma}$ ) 呈线性关系, 表现出类似于牛顿流体的行为。

$$\tau = \tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma} \quad (3)$$

Bingham 模型认为剪切应力与剪切速率成线性关系。然而, 在外加电场作用下, 流体动力击穿与引力之间的竞争使其流变行为变得复杂。Bingham 流体模型并不总是与实际流动曲线一致, 因此, 研究者利用其他流变方程来分析流动曲线, 包括 Herschel-Bulkley 模型、De Kee-Turcotte 模型、Seo-Seo 模型和 Cho-Choi-Jhon 模型[35]。

与 Bingham 模型相比, Herschel-Bulkley 模型也能反映流体剪切变稀或剪切增稠的程度。公式 (4) 中,  $m$  为

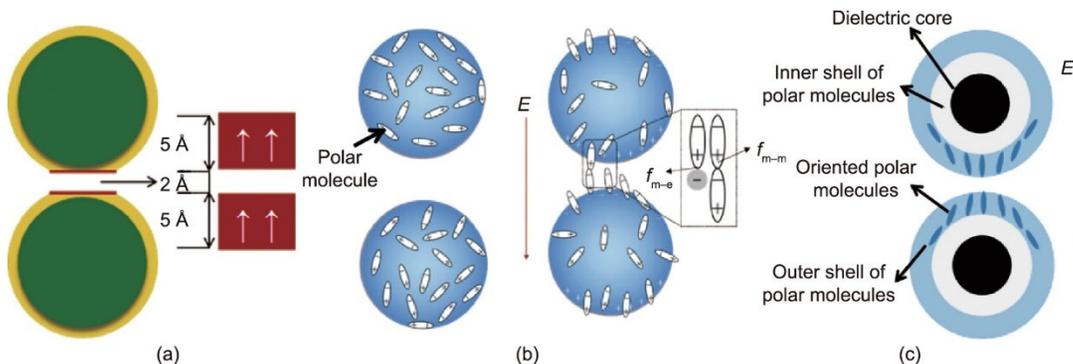


图 3. (a) 表面饱和和极化模型; (b) 极性分子取向成键模型; (c) 饱和和取向极化模型。

一致性指数,  $n$  为流体剪切变稀指数。如果  $\tau < \tau_0$ , 则 Herschel-Bulkley 流体表现为固体, 否则表现为流体。当  $n < 1$  时, 流体为剪切变稀流体,  $n$  越小剪切变稀现象就越明显。当  $n > 1$  时, 流体为剪切增稠流体,  $n$  越大剪切增稠流变行为就越强。

$$\text{Herschel-Bulkley 模型: } \tau = \tau_0 + m\dot{\gamma}^n \quad (4)$$

由于实验观察与 Bingham 流体模型的偏差, De Kee-Turcotte 模型也已被广泛用于描述包括 ERF 在内的各种悬浮体系的流变响应。

$$\text{De Kee-Turcotte 模型: } \tau = \tau_0 + \eta_1 \dot{\gamma} e^{-t/\tau} \quad (5)$$

式中,  $\eta_1$  为高剪切速率下屈服应力消失时的剪切黏度;  $t$  为时间常数, 单位为秒 (s) [36]。

屈服应力是评价 ERF 性能最重要的变量。然而, 大多数模型仅预测静态屈服应力, 对动态屈服应力预测模型的研究较少。为了获得静态屈服应力, Seo 等[37-38]提出了如下的四参数模型:

$$\text{Seo-Seo 模型: } \tau = \tau_{sy} \left[ 1 - \frac{1 - \exp(-a\dot{\gamma})}{1 + a\dot{\gamma}^\alpha} \right] + \eta_\infty \dot{\gamma} \quad (6)$$

式中,  $\tau_{sy}$  为静态屈服应力;  $\eta_\infty$  为高剪切速率下的黏度, 可视为零场黏度;  $a$  为时间常数, 即流变行为发生变化的临界剪切速率的倒数;  $\alpha$  为与应力下降有关的测量系数。

此外, 经常可以观察到, 在较宽的剪切速率范围内会出现一个平台区域, 在较低的剪切速率下存在着一个最小的剪切应力。如下含有六个参数的模型可以更好地拟合这些 ERF:

Cho-Choi-Jhon 模型:

$$\tau = \frac{\tau_{dy}}{1 + (t_1 \dot{\gamma})^\alpha} + \eta_\infty \left[ 1 + \frac{1}{(t_2 \dot{\gamma})^\beta} \right] \dot{\gamma} \quad (7)$$

式中,  $\tau_{dy}$  为动态屈服应力, 定义为低剪切速率区域外推应力;  $\beta$  为高剪切速率区域参数;  $t_1$ 、 $t_2$  为时间常数。该模型可以很好地反映整个剪切速率范围内的 ER 特性, 包括剪切应力降低现象[39-40]。

除了上述模型外, 还有许多其他流变模型, 如 Casson 模型和 Papanastasiou 模型。这些模型大多是经验公式, 需要拟合以找到适合不同类型的 ERF 的参数, 其力学性能无法从理论上进行解释。一般来说, 这些模型只适用于部分特定类型的 ERF, 而不是所有的 ERF。

### 2.3. 分散相的研究

分散相可以是固体材料, 也可以是液体材料, 但由于液体材料成本高, ER 性能差, 大多数 ERF 采用固体颗粒作为其分散相。分散相材料必须具有高介电常数、适当的

电导率、合适的密度和相对稳定的物理化学性质。常见的分散材料包括介电无机物、导电有机物和聚合物、生物聚合物和液晶[41]。为了提高悬浮液的 ER 效果, 可以通过表面改性、热处理、掺杂、包覆、杂化等技术对各种 ER 颗粒材料进行进一步加工[42]。早期的研究主要集中在如何提高 ERF 的静态屈服应力。由于分散是影像 ER 性能的主要因素, 分散相的研究一直是研究人员关注的焦点, 包括颗粒的电导率、介电常数、体积分数、大小、形状、结构和几何特征等方面的研究。

大多数 ERF 的分散相选择的固体材料主要有无机非金属材料、有机材料和聚合物半导体材料。有机材料本质上是离子晶体材料, 而有机和聚合物半导体材料一般是含有共轭  $\pi$  键的导电材料。无机材料通常是金属氧化物和硅酸盐材料, 如  $\text{TiO}_2$ 、硅酸铝等[16]。这些类型的材料具有良好的 ER 效应, 但由于金属阳离子的运动, 该类型 ERF 的电流密度相对较高, 另外该类材料大多硬度较高, 使用时易损伤机械器件。此外, 这种悬浮液还有一个很大的缺点就是颗粒易沉降, 为此有大量研究主要集中于如何提高该类型 ERF 的抗沉降性能。例如, 2021 年, Kuznetsov 等[43]制备了解聚纳米金刚石颗粒/聚二甲基硅氧烷 (PDMS) ERF。首次将半导体碳单独用作分散相。纳米金刚石颗粒表面的官能团不仅提高了这些 ERF 的抗沉降率, 而且使分散相均匀分散。这类纳米金刚石颗粒/PDMS ERF 的出现为 ERF 分散相的研究和开发提供了新的思路。此外, 当使用无机材料颗粒作为分散相时, 通常使用水作为 ERF 中的极性分子。水可以赋予 ERF 较高的屈服强度, 但较差的温度范围和耐久性限制了其应用的发展[13]。因此, 近年来研究人员试图寻找新的方法来制备高屈服强度的 ERF, 以扩大 ERF 的应用范围。如 Qiu 等[44]制备了嵌有碳纳米团簇的无水  $\text{TiO}_2$  颗粒。他们在钛酸四丁酯水解制备二氧化钛颗粒的过程中引入碳源 (葡萄糖或蔗糖), 并通过高温处理将颗粒中的葡萄糖或蔗糖碳化, 得到镶嵌纳米碳团簇的  $\text{TiO}_2$  颗粒。无水 ERF 的静态屈服应力增加了 120 kPa ( $E = 5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 体积分数为 38%), 大于  $\text{TiO}_2$  ERF 的静态屈服应力 (7 kPa)。无水 ERF 的电流密度仅为  $1.2 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$  ( $E = 5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ )。无水 ERF 具有良好的机械温度稳定性和耐磨性。通过简单的水热法制备了仿栗子状氢氧化钴与表面功能化碳点 (CD) 偶联颗粒 [ $\text{Co}(\text{OH})_2 @ \text{CD}$ ] [45]。相应的  $\text{Co}(\text{OH})_2 @ \text{CD}$ -ERF 的 ER 效率约为 10 000 (剪切速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ,  $5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ )。这得益于 CD 表面亲脂基团和仿生栗子结构的协同作用,  $\text{Co}(\text{OH})_2 @ \text{CD}$ -ERF 的零场黏度仅为  $0.46 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (颗粒质量分数为 40%)。  $\text{Co}(\text{OH})_2 @ \text{CD}$ -ERF 具有优良的热稳定性和低电流密度。此外, Dong 等

[46]、He等[47]、Zhao等[48–49]也采用疏水聚离子液颗粒分散相制备ERF，获得了无水ERF。

导电有机物和聚合物在基液中比无机材料更具分散性，但ER效应较弱。这类材料可分为两类：一类是含有具有适当导电性的共轭 $\pi$ 键的材料，另一类是分子链上具有可极化基团（羟基、氰基或氨基）的材料。前者，如聚苯胺（PANI）、聚吡咯（PPy）、聚噻吩、聚苯乙烯酮自由基、聚苯二胺和氧化聚丙烯腈，由于它们的介电常数大，在电场作用下容易极化。后者具有较大的分子质量和较高的电荷密度。通过控制碳化温度、反应时间和pH值等反应条件，可以调节聚合物材料的电导率[12,41]。然而，由于颗粒团聚，这种ERF具有较高的电流密度和较差的分散稳定性。通过在表面涂上不导电的有机物质或将材料与无机物杂化，可以减弱这种现象。此外，近年来，研究人员采用在聚合物表面涂覆氧化石墨烯（GO）的方法来提高这些ERF的分散性和稳定性[50–53]。Wang等[54]利用聚离子液体（PIL）ER活性颗粒与商用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米磨料形成复合ER抛光颗粒，通过Pickering乳液聚合制备了复合ER抛光颗粒。该方法将ER活性颗粒和纳米磨料整合到一个颗粒体系中，很好地克服了由简单混合法制备的ER抛光液易相分离的问题。

介电性能包括介电常数和介电损耗。介电常数存在一个边界点，当介电常数大于该点时，ERF的屈服应力随着介电常数的增加而迅速增大，并随着介电常数的继续增大而趋于饱和。影响ER效应的因素很多，不能仅通过介电常数来判断ERF的性能。事实证明，高介电常数材料的ER效应并不一定强。只有当颗粒具有一定的介电损耗时，流体才会产生ER效应。介电损耗在电场频率为100~105 Hz范围内有最大值。颗粒电导率决定了整个悬浮液的电流密度、ER效应和响应时间。当颗粒的介电常数一定时，电导率越高，颗粒的响应越快。电导率越小，颗粒响应越慢，ER效应不明显[55]。Lee等[56]将不同电导率的 $\text{MoS}_2$ 纳米片分散在硅油中制备ERF，研究颗粒电导率对ER性能的影响。找到最合适的电导率值，在此电导率值下，ER换器效率最高。如果颗粒电导率过高，则ER响应减弱[57]。

材料性能对ERF的性能有很大的影响。同样，ERF的颗粒体积分数将极大地影响屈服强度、零场黏度和抗沉降性能。随着ERF体积分数的增加，单位体积颗粒数增加，颗粒之间的距离减小，颗粒更容易形成粗链和柱状结构，因此ERF的屈服强度增加[58]。此外，ERF中存在许多体效应，并随着浓度的增加而增加，直到达到饱和。因此，随着颗粒间相互作用力趋于饱和，剪切屈服应力将难

以进一步增大[59]。此外，颗粒体积分数过高可能导致ER效率降低，不利于实际应用。大多数研究表明，分散相的最佳体积分数在0.1~0.4范围内。在不同的ERF中，屈服应力通常与体积分数呈幂律关系或近似线性关系[60]。除影响流变性能外，颗粒体积分数越大，抗沉降性能越好。随着单位体积内颗粒数量的增加，颗粒形成的抵抗重力作用的空间网络结构变得更强。然而，这种方法会极大地影响ERF的流变性能，因此不适合实际应用。

一般认为，GERF颗粒越小，屈服应力越大，GERF也证明了这一点。由于GERF的总能量密度与 $1/R$ 成正比，因此屈服应力与总能量密度成正比[61]。然而，过小的颗粒容易结块，使得悬浮液的零场黏度很高。在GER模型中，颗粒的大小应为10~104 nm。颗粒粒径在此范围内越小，ER效应越明显。此外，粒径小的颗粒在电场作用下容易在两电极之间跳跃，增强电荷交换，呈现更高的电流密度[62]。

除了粒径对ERF性能的影响外，颗粒的各种结构和形态也对其性能产生巨大的影响，不仅提高了ERF的ER效应，而且降低了零场黏度，降低了电流密度，提高了稳定性。因此，对颗粒结构和几何形状的研究也成为近年来的研究热点。下面总结了具有优良颗粒结构或形貌的ERF。

### 2.3.1. 核壳结构

核壳结构是最具代表性的结构，在ERF中应用最广泛。以核壳颗粒为分散相的ERF通常具有较高的ER效率和优异的颗粒分散及抗沉降性能[63]。通常选择介电常数高的材料作为颗粒的核心，这直接影响相应的ERF的屈服应力。如Wu等[64]采用不同介电常数的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{TiO}_2$ 作为颗粒的核心材料，制备了两种核壳结构的羟基草酸钛（TOC）颗粒[图4（a）和（b）]。在相同的外电场下， $\text{TiO}_2$ -TOC ERF的屈服应力远高于 $\text{SiO}_2$ -TOC ERF，这是由于 $\text{TiO}_2$ 比 $\text{SiO}_2$ 具有更高的介电常数。因此，核壳颗粒核心的选择就显得尤为重要。此外，颗粒壳的材料多样，可以选择不同的材料作为颗粒壳，以达到不同的性能提升目的。Wen等[8]制备的GERF颗粒具有以下结构：以钛氧基草酸钡纳米颗粒为核心，外层为尿素涂层[图4（c）]。值得注意的是，涂层不能很厚，因为饱和极化随着涂层厚度的增加而稳步下降。此外，Wu等[65]以甲酰胺（FA）和 $N,N$ -二甲基甲酰胺（DMF）作为 $\text{TiO}_x$ 颗粒的外壳，通过溶胶-凝胶水解和自组装制备了两个核壳颗粒（ $\text{TiO}_x$ -FA和 $\text{TiO}_x$ -DMF）[图4（d）和（e）]。 $\text{TiO}_x$ -FA ERF在 $5 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 外电场下表现出优异的力学性能，其屈服应力为148 kPa。

然而，当使用介电常数较低的DMF作为壳层时，ER性能相对较低，表明ER性能与外壳的介电常数呈正相关。核壳复合颗粒具有内层和外层的优点，表现出增强的ER效应和分散稳定性。当然，正如Li等[66]所报道的那样，外壳也可以改善ERF的分散性和抗沉降性，他们在GER颗粒表面涂覆纳米颗粒——多壁碳纳米管（MCNT），大大提高了GERF的抗沉降性能。此外，在ER颗粒表面涂覆氧化石墨烯也可以改善颗粒的分散性和ERF的稳

定性[67]。

### 2.3.2. 中空结构

除核壳结构颗粒外，空心结构颗粒因其低密度、高比表面积和抗沉降性能而备受关注。与纯颗粒悬浮液相比，在相同条件下，空心颗粒悬浮液的屈服应力值要高得多[68–69]。模板法是目前最常用的制备空心结构的方法，即使用微/纳米球、多孔结构或其他硬质材料作为空心部

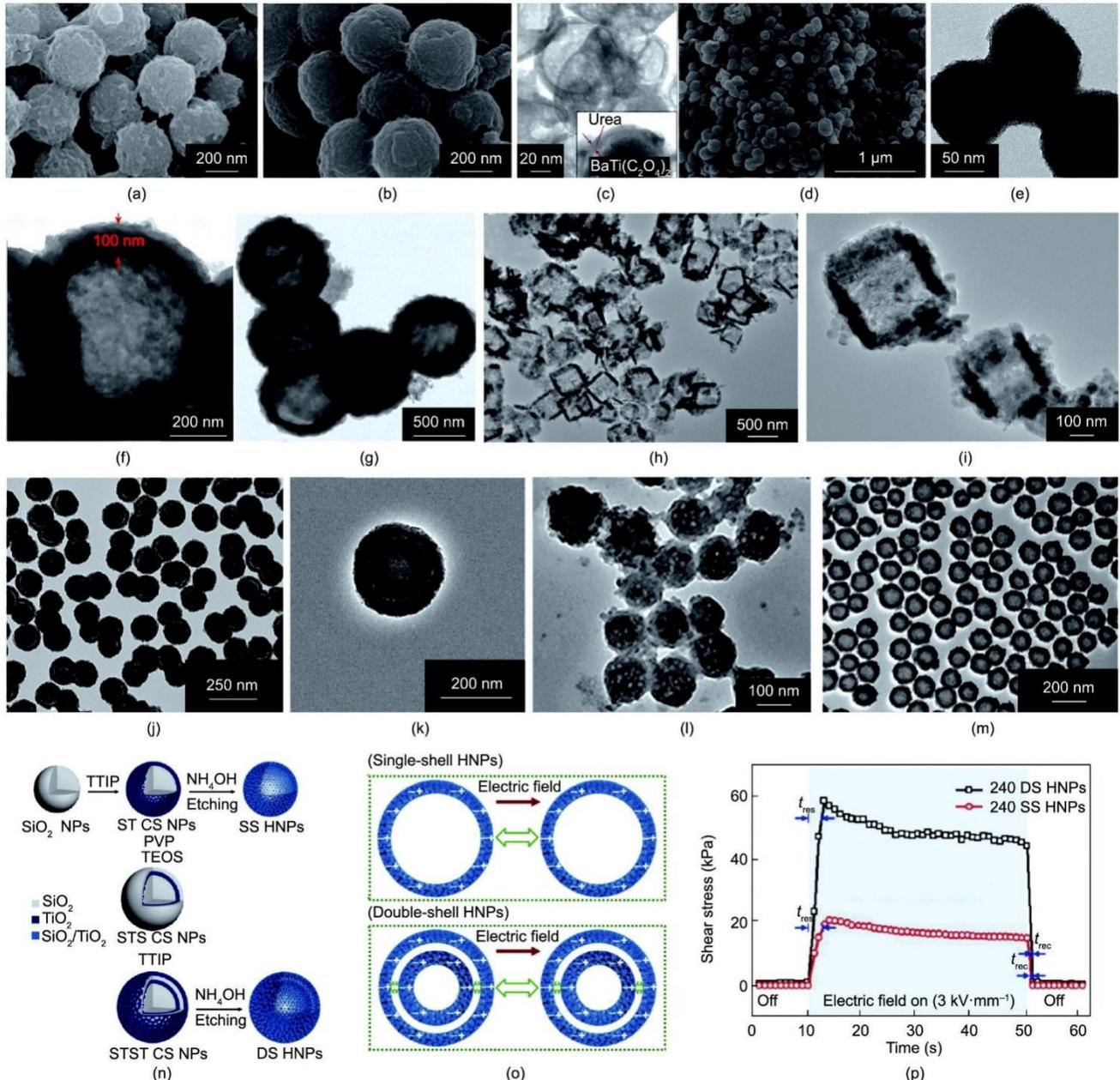


图4. 具有核壳结构的 $\text{SiO}_2$ -TOC (a) 和具有核壳结构的 $\text{TiO}_2$ -TOC (b) 颗粒的扫描电镜 (SEM) 图像。(c) 包裹在尿素中的钛氧基草酸钡颗粒的透射电镜 (TEM) 图像。 $\text{TiO}_2$ -FA 颗粒的 SEM 图像 (d) 和  $\text{TiO}_2$ -DMF 颗粒的 TEM 图像 (e)。(f)、(g) 聚苯胺空心球的 TEM 图像。(h)、(i) 空心  $\text{TiO}_2$  纳米盒的 TEM 图像。直径分别为 120 nm (j) 和 240 nm (k) 的双壳空心 NP (DS HNP) 的 TEM 图像。(l) 多孔 PPy/ $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的 TEM 图像。(m) 二氧化硅/二氧化钛 (S/T) HNP 的 TEM 图像。(n) SS HNP 和 DS HNP 的制备工艺示意图。CS: 核/壳; SS: 单层; STST: 二氧化硅/二氧化钛/二氧化硅/二氧化钛; TEOS: 硅酸乙酯; TTIP: 异丙醇钛; PVP: 聚乙烯吡咯烷酮。(o) 外加电场作用下 SS HNP 和 DS HNP 的极化模型。(p) 在  $3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  电场作用下, SS HNP ERF 和 DS HNP ERF 的剪切应力。 $t_{\text{res}}$ : 响应时间;  $t_{\text{rec}}$ : 恢复时间。

分的模板。首先制备核/壳复合微球，然后通过煅烧或蚀刻得到相应的空心颗粒。如Gao等[69]以单分散聚苯乙烯(PS)种子为核，包覆聚苯胺为壳，在室温下用四氢呋喃(THF)除去PS核，然后洗涤、过滤、干燥，制得导电聚苯乙烯空心球[图4(f)、(g)]。同样，Sung等[70]也使用PS作为空心结构颗粒核的模板，通过氧化聚合法制备聚苯胺壳。用有机溶剂溶解聚苯胺，得到中空聚苯胺颗粒。除了常用的模板法，研究人员还通过水热法制备了不同形状的空心TiO<sub>2</sub>颗粒[68,71]。Li等[72]开发了一种使用TiOF<sub>2</sub>立方体作为前驱体水热法制备空心TiO<sub>2</sub>纳米盒的方法[图4(h)和(i)]。ER测试表明，空心TiO<sub>2</sub>纳米盒ERF具有良好的ER效应，并提高了ER效率。这些研究结果表明，空心结构对ERF各方面的性能提升都有积极的作用，因此这种结构也是未来研究和开发ER颗粒的主要方向。

Lee等[73]首次成功制备并采用了双壳SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>空心纳米颗粒[图4(j)和(k)]作为ERF的分散材料，研究了壳结构对ERF性能的影响。Yoon等[74]也使用相同的蚀刻方法制备了反向导电聚合物/金属氧化物核/壳结构多孔PPy/SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>纳米颗粒[图4(l)]，以及掺杂Mg、Zn和Fe的二氧化硅/二氧化钛空心纳米颗粒(ST HNP)[图4(m)] [75-76]。双壳中空纳米颗粒(DS HNP)的形成过程如图4(n)所示。首先采用Stöber方法制备二氧化硅纳米颗粒作为核心模板，然后采用溶胶-凝胶法将TiO<sub>2</sub>壳包覆在二氧化硅核心模板上。然后，依次包覆一层SiO<sub>2</sub>和一层TiO<sub>2</sub>，得到SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>核/壳纳米颗粒(STST CS NP)。最后，用NH<sub>4</sub>OH对STST CS NP进行超声刻蚀，得到DS-HNP。SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>单壳中空纳米颗粒(SS HNP)的制备方法类似。随着壳层数的增加，界面极化增大，ER性能显著提高。如图4(o)所示，这类颗粒结构具有较高的比表面积。当外加电场作用于流体时，ER颗粒沿电场方向产生强极化。因此，颗粒之间存在较大的极化力，从而产生较大的剪切应力。SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> DS HNP基ERF表现出优异的ER性能，是SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> SS HNP基ERF的4.1倍[图4(p)]。此外，低密度多层中空颗粒基ERF具有优异的抗沉降性能。但空心颗粒的合成工艺复杂，颗粒容易结块，难以实现规模化生产。

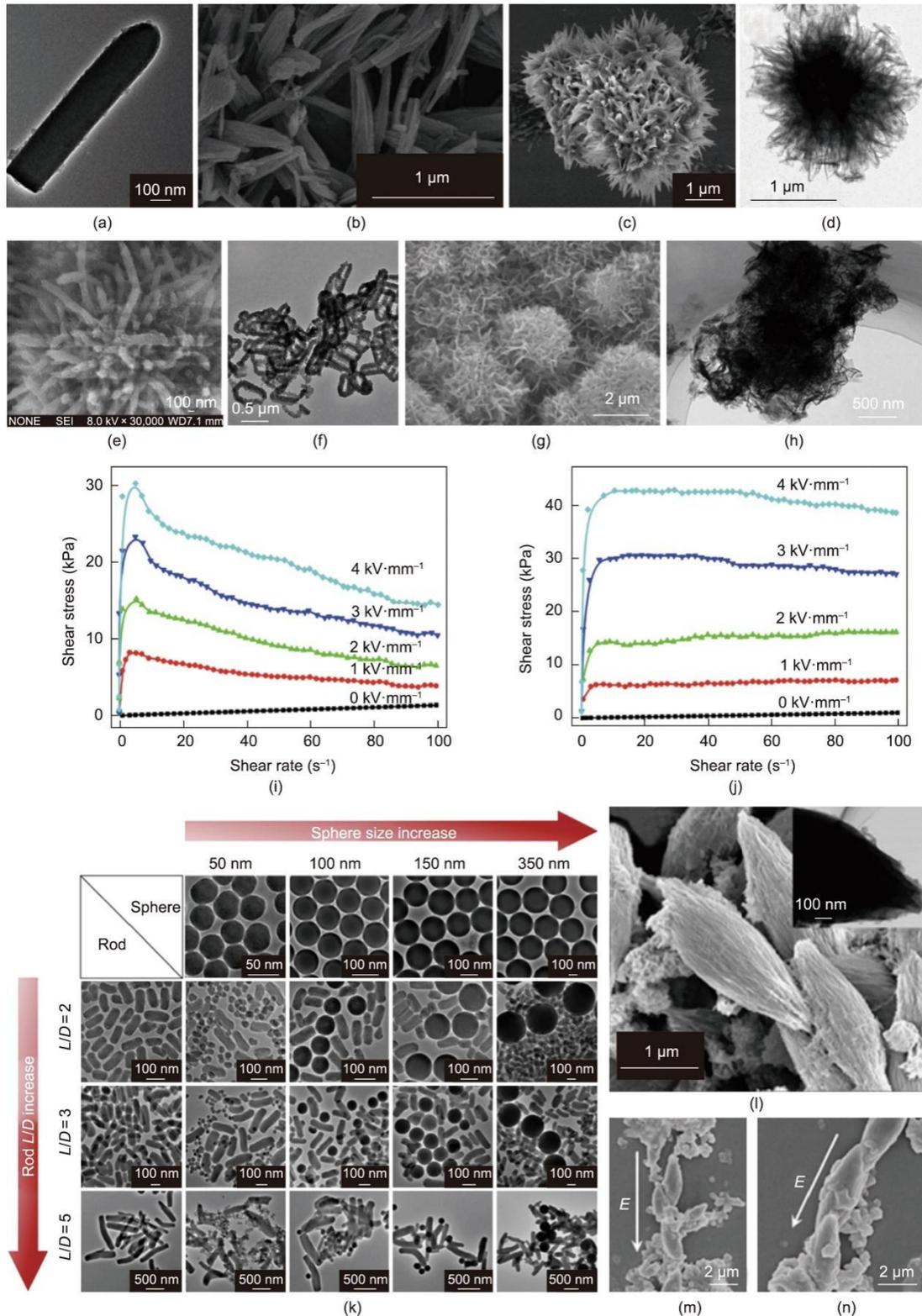
### 2.3.3. 颗粒几何结构

各向异性颗粒比球形颗粒表现出更大的屈服应力和更低的状态黏度。这是由于流动阻力和机械稳定性的几何效应，以及几何和介电性能的协同效应导致ER活性的增加。由于棒状颗粒的长径比大，在外加电场作用下会产生

比球形颗粒更大的偶极矩，因此棒状颗粒受到研究者的关注[77]。例如，Lee等[78]制备了涂有氧化石墨烯的二氧化硅棒状颗粒[图5(a)]。此外，通过改变颗粒的长径比，研究颗粒几何形状对ERF性能的影响。结果表明，长径比较大的棒状颗粒具有较大的介电常数和较短的界面极化弛豫时间。Wu等[79]制备了具有棒状结构的表面活性剂修饰的钛氧基草酸钙(SCTO)颗粒[图5(b)]。得到的SCTO ERF具有较高的屈服应力，约为球形钛氧基草酸钙ERF的两倍，并且具有较低的零场黏度，从而实现了更高的ER效率。较高的ER活性主要来源于SCTO的棒状结构。

除了棒状颗粒外，其他不同形状的颗粒作为ERF分散相也能提高ERF的性能。这些独特的形貌扩大了表面积，从而改善了界面极化和ER活性。例如，研究人员还制备了菊花状颗粒[图5(c)] [80]、用二硫化钼片包裹的花状TiO<sub>2</sub>颗粒[图5(d)] [16]、仙人掌状二氧化钛颗粒[图5(e)] [81]、纳米夹状PANI颗粒[图5(f)] [17]。将这些不同几何形状的颗粒作为分散相制备ERF。它们的ER性能远高于使用相同材料球形颗粒的ERF。一些几何颗粒不仅能改善ERF的ER性能，而且对ERF的动态剪应力的稳定性也有积极的影响。Wu等[82]在不添加表面活性剂的情况下制备了具有银耳状褶皱结构(W-TTO)的草酸钛(TTO)颗粒[图5(g)和(h)]。由于W-TTO与硅油之间的润湿性得到了改善，与原TTO ERF相比，W-TTO基ERF的ER活性得到了增强。更重要的是，随着剪切速率的增加，球形TTO颗粒ERF的动剪应力会减小[图5(i)]，而W-TTO颗粒ERF的动剪应力在整个剪切速率范围内保持稳定[图5(j)]。

混合不同形式的颗粒相比于单一颗粒系统作为分散相，具有更好的ER效应。例如，Yoon等[15]通过混合不同尺寸的SiO<sub>2</sub>球和SiO<sub>2</sub>棒，观察混合几何效应[图5(k)]。由高长径比的小球和小棒组成的双峰ERF，在低浓度的球下，比相应的单SiO<sub>2</sub>棒状ERF的ER效率提高了23.0%。这主要是因为棒状材料形成高度连接的纤维状结构，球体位于纤维状棒状材料附近或填充在纤维状棒状材料之间的空间。在这些形式中，纳米ER材料可以诱导更高的ER活性，棒状材料可以有效地产生机械稳定性。在两种颗粒的协同作用下，ERF不仅具有良好的ER性能，而且具有较高的抗沉降性能[15]。此外，Wu等[83]报道了一种由微米大小的细长颗粒和纳米大小的不规则颗粒组成的新型微/纳米颗粒杂化钛氧基草酸钙(HCTO) ER材料[图5(l)]。由于枣状颗粒两端的几何结构，在外加电场的作用下，颗粒之间会形成更强的局部电场，从而产生更强的感应偶极



**图 5.** (a) 氧化石墨烯包裹二氧化硅棒的 TEM 图像。(b) SCTO 颗粒的 SEM 图像。菊花状颗粒 (c) 和花状纳米结构 (d) 的 SEM 图像。(e) 仙人掌状颗粒的 SEM 图像。(f) 纳米夹状聚苯胺颗粒的 TEM 图像。(g) W-TTO 的 SEM 图像。(h) W-TTO 的 TEM 图像。在不同电场强度下，体积分数为 32% 的 TTO (i) 和 W-TTO (j) ERF 的剪切应力随剪切速率的变化而变化。(k) 不同尺寸的 SiO<sub>2</sub> 球形颗粒和不同长径比的 SiO<sub>2</sub> 棒状颗粒及其混合物的 TEM 图像。(l) 主轴颗粒的 SEM 图像及其 TEM 图像 (插图)。(m)、(n) 在外加电场作用下 HCTO 颗粒组成结构的 SEM 图像。

矩，增大颗粒之间的作用力。同时，纳米颗粒聚集在细长微粒的连接处，以类似于混凝土结构的方式形成更强的几

何形状[图 5 (m)、(n)]。此外，这种双峰体系的沉降速率较低，比单纳米颗粒组分体系的沉降速率略大[83]。

## 2.4. 连续相位的研究

连续相也被称为分散剂相。根据介电理论，首先需要离散相和连续相之间的介电失配关系。此外，理想的连续相应具有以下特点：低挥发性、高化学稳定性、高沸点、低凝固点、高抗穿刺性、低黏度以及与分散相相匹配的适当密度。如果油相的密度与颗粒的密度相等，则ERF不会沉降。遗憾的是，到目前为止还没有找到合适的高密度载体液体。连续相对ERF的性能影响很大，因此由于硅油性能稳定，目前被广泛用作ERF的连续相。对ERF连续相的研究相对较少，但近年来，研究人员通过连续相与颗粒的相互作用，显著提高了ERF的效率和抗沉降性能。下面将介绍两种类型的研究：常见的单液相（SLP）ERF和最近取得研究进展的双液相（BLP）ERF [14]。

### 2.4.1. 单液相ERF

SLP ERF中应用最广泛的连续相是二甲基硅油[84]。研究人员发现，颗粒更容易沿着电场方向排列，形成稳定牢固的柱状结构，从而在低电场强度下产生更显著的ER效应。此外，由于低黏度的油基ERF具有较低的零场黏度，因此具有较高的ER效率。然而，使用高黏度硅油作为ERF的连续相具有以下两个优点：泄漏电流密度低、可逆性好

除黏度外，有学者发现油相的突出端基对ER效应有直接影响。零场黏度和屈服应力值可以通过不断改变终止官能团来调节。例如，与甲基或二缩水甘油酯基硅油相比，端羟基硅油的GERF具有最高的屈服应力值。由于末端羟基较小，空间位阻对颗粒聚集的影响也较小，有利于颗粒在电场中的聚集。另外，末端羟基具有一定的极性，在电场作用下会发生一定的取向。这增强了颗粒的聚集，形成更厚的链结构，并产生较大的剪切应力。同时，氢键的作用往往使颗粒形成更大的团簇，从而使ERF的零场黏度略有增加[85–86]。

由于ERF的分散相和连续相之间的润湿特性不同，混合后它们往往表现出明显的流体样黏度，很像黏土或凝胶。一般来说，颗粒与连续相之间的润湿性越好，制备的ERF黏度越低，ER效果越好。由于润湿性差的颗粒不能很好地分散在连续相中，容易发生固液分离，导致ERF具有较高的零场黏度。而具有优异润湿性的颗粒能够很好地分散在连续相中而不会过度团聚，这有利于颗粒之间局部电场的形成[87–91]。此外，良好的润湿性有助于在实际应用中获得低电流密度和低沉降速率的ERF。这一点最近得到了证实。Wu等[82]研究发现，润湿性好的ERF电流密度明显低于润湿性较差的ERF。在不湿润的情况下，

电子可以很容易地穿过紧密接触的颗粒。对于润湿性较好的颗粒，可以将连续相很好地置于颗粒表面，形成较好的绝缘层，从而限制了在外加电场作用下的迁移，达到降低电流密度的效果。

### 2.4.2. 双液相ERF

对于单个连续相位的ERF，改变连续相位通常只能改善它的一个特性。例如，虽然使用低黏度硅油作为ERF的连续相可以降低ERF的黏度，但其抗沉降性能会下降。因此，使用两种或两种以上的液体，利用它们在颗粒润湿性方面的不同特性，可以同时提高ERF的性能。

将烷烃和硅油按一定比例混合，作为GERF的连续相。通过这种简单地改变连续相位的方法，制备了BLP GERF（图6）[14]。由于GERF颗粒对二元液相的表面润湿性非常不同，以及烷烃分子与颗粒之间的疏水相互作用，分散的粒径分布被拓宽。因此，BLP GERF的ER效率高达10 656，是SLP GERF的1.8倍。并且，虽然它的黏度极低，但稳定性仍然很好。此外，通过跟踪背散射光强，测量了GERF浓度在垂直方向上的变化。测试了BLP GERF的长期稳定性，发现BLP GERF在100 d以上表现出优异的抗沉降性能和稳定性。

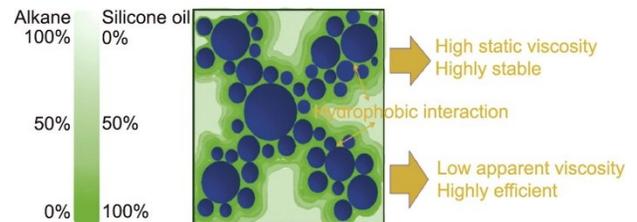


图6. BLP GERF中分散相和连续相的分布。

## 2.5. 添加剂的研究

添加剂的作用是增强颗粒在液相中的稳定性，提高颗粒的介电常数，改善颗粒与连续相之间的润湿性。添加剂的添加量很小（质量分数为0.01%~5.00%），但对ERF有很大的影响。各种表面活性剂是常见的添加剂，如阴离子表面活性剂、阳离子表面活性剂和非离子表面活性剂。

表面活性剂是由非极性长链疏水基团和极性亲水基团组成的两亲性化合物。在油水界面处，亲水端溶解在水中，疏水端溶解在油中，从而形成排列的单层。不同类型的表面活性剂的疏水性基团具有相对较小的结构差异，通常为支链或线性链。常见的疏水性基团包括-CH<sub>3</sub>链、-CF<sub>3</sub>链和-Si。亲水端为亲水性无机盐或结构差异较大的各种类型的极性有机物。常见的亲水性基团有-OH、-COOH、-CONH<sub>2</sub>等。阴离子表面活性剂的亲水端为阴离子，是使

用最早、最广泛的表面活性剂。常见的类型主要有羧酸盐、磷酸盐、硫酸盐等。阳离子表面活性剂的亲水端为含氮阳离子基，最常用的是铵盐和季铵盐。两性离子表面活性剂的亲水端同时含有阴离子和阳离子。这种表面活性剂在酸性溶液中呈阳离子，在碱性溶液中呈阴离子，通常为氨基酸型或甜菜碱型。非离子型表面活性剂在水中不离解带电，其亲水基团主要是醚基和游离羟基，常见的有聚氧乙烯型和多元醇型[92]。表面活性剂的数量是至关重要的：太少则不能提供增强效应，而过多的自由添加剂则会导致电流密度急剧上升[18]。

由于通过使用添加剂提高ERF性能的方法简单，并且添加剂的作用非常明显，因此研究人员研究了多种多样的添加剂对ERF的影响[91–94]。例如，Shen等[88]在聚 $\alpha$ -烯烃中加入体积分数为0.03%的油酸，再与颗粒混合，导致流体特性完全不同。该流体在 $3\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 下获得了260 kPa的高屈服应力，而添加之前是没有ER效应的。此外，Wang等[91]通过添加十二烷基苯磺酸钠（SDBS），降低了二氧化钛颗粒的粒径，提高了二氧化钛颗粒在基液中的润湿性，改善了ER性能。Qiao等[94]报道加入适量十二烷基磺酸钠后的悬浮液具有优异的抗沉降性能。Xu等[95]研究了表面活性剂Span对GERF颗粒-油相互作用和团聚效果的影响。

Xu等[18]通过添加有机硅聚醚（ofx-0309和ofx-0400）对GER颗粒表面进行改性，进行性能调整。基本制备工艺如图7所示。在固-液界面处应用表面活性剂进行吸附，可以在GER颗粒上形成吸附层，可以很好地覆盖表面暴露的极性分子，有效降低泄漏电流密度。硅聚醚的加入削弱了GERF的屈服应力，但提高了颗粒在硅油中的分散性和稳定性。此外，加入适量的有机硅聚醚有利于降低GERF的漏电流密度。通过对GERF各项性能的权衡，通过改变表面活性剂的种类和用量，制备出最平衡的GERF。这种方法非常有指导意义，因为该方法提供了重复稳定性和广泛的工业应用[18]。

## 2.6. ERF的应用

ERF在工程领域得到了广泛的应用。这里简要介绍近年来其在微流控技术和阻尼器中的应用。

### 2.6.1. 微流控中的应用

1990年代末，Manz等[96]提出了“全化学分析系统（ $\mu$ TAS）”的概念，强调了微器件在化学和生物检测中的重要性。在此后衍生的众多分支中，微流控更加关注流体输运现象、微器件设计和微米尺度上的应用。为了开发不

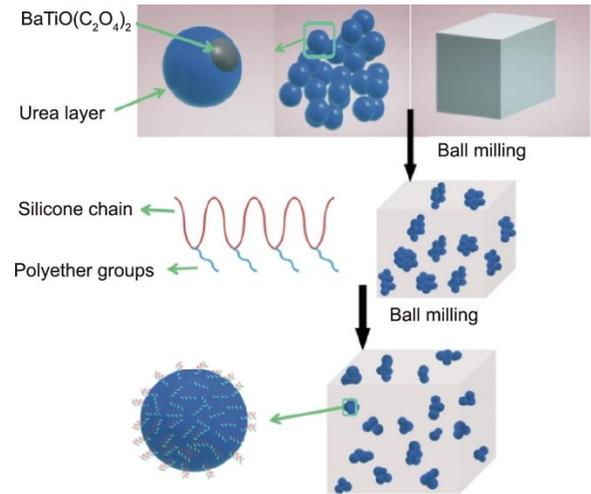


图7. 用有机硅聚醚改善GERF性能的方法示意图[18]。

同的微流控功能组件，GERF由于对电场毫秒级的强响应而被用作高效的智能介质。

当GERF被引入微流控中时，它可以以两种模式控制其他流体：非接触模式——两种流体在不同的通道中流动，GERF通过推或拉两种流体之间的薄隔膜来影响被控制流体；GERF与被控流体在同一通道内流动并产生和控制“智能”液滴的接触模式。微流控中的GERF既可以用于控制连续流体，也可以用于控制单个液滴，从而产生微阀、微混合器、微整流器和微流控逻辑门等功能部件。

由于在一定的外加电场作用下，GERF的剪切应力可达到100 kPa以上，因此设计的GERF微阀[97]可用来控制其他通道。在GERF通道和受控通道之间插入一个膜片，在GERF通道两侧嵌入两对电极，一个在膜片的上游，另一个在下游。如果对下游电极施加足够大的电场，则GERF的黏度会增加，并且膜片会发生一定的变形，从而阻塞部分受控通道，降低流量甚至导致通道关闭。相反，当上游电极对施加电场时，压力减小，GERF侧的隔膜膨胀，打开受控通道，如图8（a）[98]所示。因此，受控通道可以根据外加电场进行调节。

将三个微阀组合在一起可以设计出一种GERF微泵，通过可编程数字控制来调节微通道中流体的流量[99]。在三对电极上施加不同极性的电压，可以控制三个隔膜的膨胀或收缩，从而控制流体的流动。GERF微泵可以实现流体的自动流动和循环，并且还可以通过调节三个隔膜的变形率来改变流量。GERF微泵具有设计简单、控制灵活、生物相容性好等优点，如在微流体检测系统中具有稳定的流动输送、用于细胞洗涤或聚合酶链反应的生物芯片中的循环流动构建，以及用于微器件中的冷却元件。

层流（ $Re < 2000$ ）和电渗透是微尺度下流体的主要

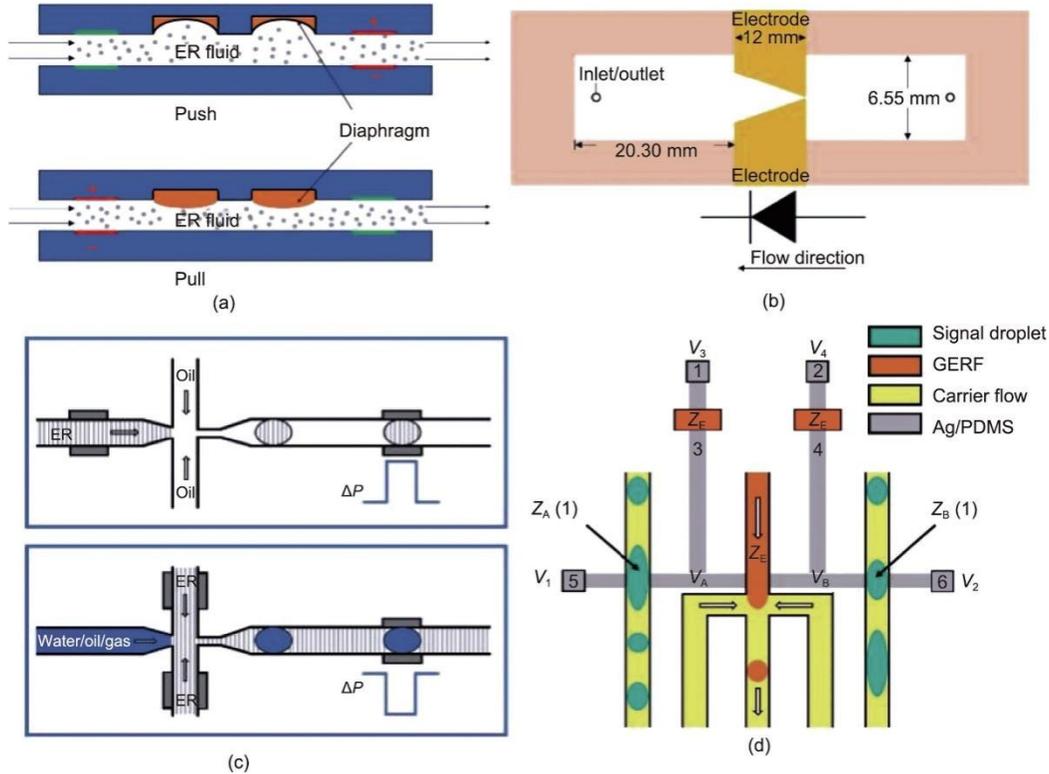


图8. GERF在微流控中的应用。(a)微阀、微泵和微混合器的隔膜控制；(b)微整流器的结构与流体运动的方向；(c)两种智能液滴示意图；(d)微流体逻辑门电路示意图。DP: 智能液滴在电场作用下产生的压差； $V_1 \sim V_4$ 为加在焊盘5、6、1、2上的电压； $V_A$ 和 $V_B$ 为输出GERF通道两侧的电势； $Z_A$ 和 $Z_B$ 分别为信号通道A和B提供的阻抗， $Z_E$ 为GERF流体阻抗。

特征。两种流体在微流控芯片中不能很好地混合。GERF微混合器[98]的发明是为了在微通道中实现有效的流体混合。在流体通道两侧设计了若干带GERF阀的侧通道。当施加电场时，侧通道交替推拉，增加了主流体通道中的对流。因此，可以通过控制电场的频率来实现混沌混合。

由于黏性流体的可逆性，在没有外力作用的情况下，很难通过几何不对称得到流体整流。在基于GERF的微整流器[100]中，黏性流体的不可逆性可以通过空间不对称结构与电场相结合来实现。在一定条件下，GERF在正向（从左向右）流动时会堵塞通道，而在反向（从右向左）流动时则可以顺利通过通道，如图8（b）所示[99]。这个功能类似于“流体二极管”，可以实现流体的单向流动。

当应用在液滴微流控系统时，GERF不仅可以作为智能液滴分散在载体流体中[101]，还可以作为智能载体控制其他液滴或气泡[102]，如图8（c）[98]所示。当一对电极嵌入在微通道旁边时，它们之间的空间可以被认为是电路的阻抗，液滴和载体之间介电常数的差异可以被转化为电信号，从而用来检测液滴或触发附近流体通道中的其他操作。通过这种方式，智能液滴可以相互通信，实现一个液滴逻辑门，如图8（d）[99,103]所示。Wu等[104]详细总结了基于GERF的微流控液滴控制。

## 2.6.2. 阻尼器中的应用

ERF自出现以来，已被广泛地应用在阻尼器等振动抑制领域。对阻尼器的研究主要分为结构设计、数学模型建立和控制算法研究三个方面。在早期阶段，研究人员主要关注阻尼器的结构设计。为了发挥ERF的可调性优势，控制算法的研究成为人们关注的焦点，以达到更好的振动控制效果。Hasheminejad等[105]提出了一个包含可调谐ERF核心的夹层圆柱壳的声传输精确模型。基于该模型的主动控制方法为解决圆柱壳工程应用中遇到的振动问题奠定了基础。该控制算法的基础是建立准确的ERF和阻尼器的数学模型。Zhao和Xu [106]提出了一种滞回模型，可作为建立ER阻尼器模型的参考。

GERF突破了ERF的性能限制，在工程应用中具有较好的前景。自被发现以来，研究人员将GERF应用于阻尼器等设备，改善了其力学性能。Pu等[107]在压缩模式下使用了GERF，并证明了GERF的优异性能。如图9（a）和（b）[107]所示，他们提出了一种工作在压缩模式下的多板电极GER阻尼器。通过实验验证了该阻尼器的力学性能。结果表明，该阻尼器在阻尼和刚度方面均有显著的变化，在工程应用中优于传统的ERF阻尼器。

Sun等[108]建立了改进的GERF阻尼器在剪切模式下

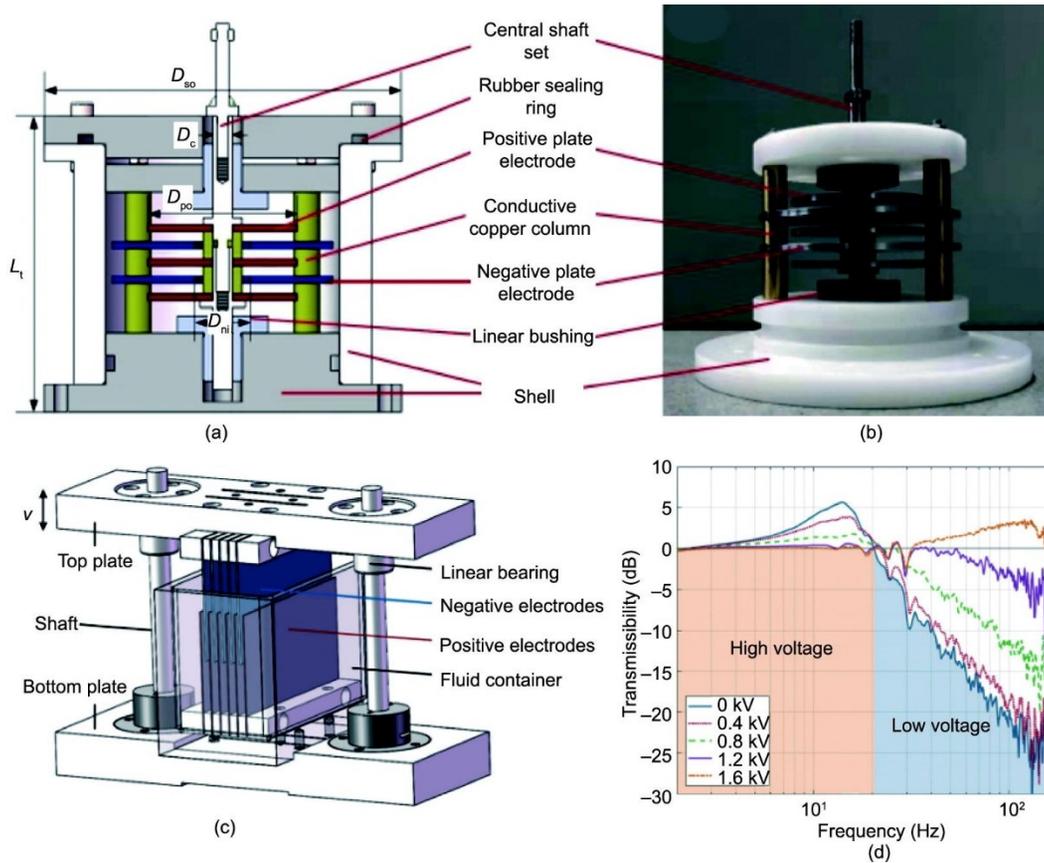


图9. 压缩模式下具有多板电极的GERF阻尼器原理图 (a) 和实物图 (b)。D<sub>c</sub>、D<sub>po</sub>、D<sub>ni</sub>、D<sub>so</sub>、L<sub>t</sub>分别为中心轴组、正极板、负极板、外壳、总尺寸。(c) 剪切模式下GERF阻尼器的结构。v: 剪切方向。(d) GERF阻尼器的传递率结果。

的滞回模型，促进了GERF在减振中的工程应用发展。在增强GERF力学性能的基础上，提出了一种由多电极组成的剪切模式阻尼器，如图9(c) [108]所示。该阻尼器具有优异的高阻尼、低刚度性能。此外，他们还提出了一种改进的数学模型，结果表明该模型能很好地描述GERF的力学性能。并进行了减振实验，验证了减振效果。试验数据表明，GERF阻尼器具有优异的阻尼效果，不仅可以减少91.3%的振动，而且具有更高的可调范围（可以达到43.8%），如图9(d) [108]所示。这充分证明了GERF阻尼器具有很高的实用价值。

### 3. 电流变弹性体

作为ERF的衍生物，ERE具有与ERF相似的ER效应，其刚度随着电场的施加而增加。ERE可以避免团聚和泄漏等问题，因此受到了广泛关注。

#### 3.1. ERE的理论研究

ERE中的ER效应产生的方式如下：在外加电场作用下，电响应颗粒产生极化，成为偶极子。因此，具有不同

电荷的颗粒相互吸引，它们沿着外加场的方向呈链状排列或有成链的倾向，从而提高了ERE的刚度。ERE的理论研究采用适当的指标评价了ERE的ER特性，并对颗粒间的相互作用进行了分析。

在评价ERE的ER性能时，ERE的剪切储能模量( $G'$ )和剪切损耗模量( $G''$ )随电场强度的增大而增大。因此，储能模量增量 $\Delta G'$  ( $\Delta G' = G'_E - G'_0$ ，其中 $G'_E$ 和 $G'_0$ 为施加电场或不施加电场时弹性体的剪切储能模量)可以作为评价弹性体ER性能的指标。此外，相对ER效应( $\Delta G'/G'_0$ )也可用于评价ERE的ER性能。

研究人员对ERE的黏弹性进行了模拟分析。Ma等 [109]对Bouc-Wen现象模型进行了修正，可以精确地描述和预测ERE在低剪切频率和正弦剪切应变下的非线性黏弹性行为，也可以推广用于描述不同低频谐波荷载的情况。由于固有的特性，ERE可以用作阻尼器件。Niu等 [110]对ERE的阻尼性能进行了研究，提出了理论模型，并得到了实验结果的验证。通过模型分析可知，在高应变幅值和高颗粒含量的情况下，界面阻尼对改性TiO<sub>2</sub>颗粒填充的ERE阻尼性能起主导作用。在低应变幅值和低颗粒含量时，本征阻尼会产生差异。该理论模型有助于制备

具有较好阻尼性能的ERE。

电场作用下颗粒间的相互吸引是ER效应产生的主要原因。根据传统的ER理论，将极化颗粒假设为小球，在电场作用下，小球之间的相互作用被具有相同强度的偶极子所取代。则电场作用下相邻颗粒间的静电力 $F$ 与电场强度 $E$ 呈二次关系[19,111]:

$$F = (3/2) \pi R^2 \epsilon_0 \epsilon_m \kappa^2 E^2 \quad (8)$$

$$\kappa = (\epsilon_p - \epsilon_m) / (\epsilon_p + 2\epsilon_m) \quad (9)$$

式中， $\kappa$ 为介电失配； $\epsilon_m$ 为基体的相对介电常数。

储能模量增量 $\Delta G'$ 同样与 $E$ 的平方成正比[19]:

$$\Delta G' = (9/4) \varphi \epsilon_m \kappa^2 E^2 \quad (10)$$

式中， $\varphi$ 为介电颗粒的体积分数。

包覆极性分子的ER颗粒更符合饱和表面极化或取向极化模型。电场作用下相邻颗粒间的相互作用受局部电场力( $F_{m-c}$ )支配， $F_{m-c}$ 与 $E$ 呈正比[111]:

$$F_{m-c} = \frac{3\varphi}{2\pi R} N f_{m-c} = A \frac{3\varphi \rho e \mu^2 E}{\pi R \epsilon_m d^2} \quad (11)$$

式中， $N$ 为取向极性分子的数量； $A$ 为与颗粒和油性质有关的常数； $\rho$ 为吸附在颗粒上的极性分子的面密度； $e$ 为元电荷； $\mu$ 和 $d$ 分别为本征偶极矩和极性分子的大小。由上式可知，在电场作用下，填充极性分子包覆的ER颗粒的ERE储能模量增量与电场强度成正比，即 $\Delta G' \propto E$ 。这从理论上解释了当电场强度增加时，包覆极性分子的ER颗粒之间的相互作用比传统ER颗粒之间的相互作用增长得更快。

### 3.2. ERE的组成

一般来说，ERE包括分散相、连续相和添加剂，它们决定了弹性体的性能。具有高介电常数、电场作用下强极化和良好的ER特性的ERE具有与ERF相同的分散相。近年来，对ERE分散相的研究主要集中在无机固体颗粒上，如 $TiO_2$  [112–114]和 $BaTiO_3$  [115–116]。ER效应主要是由ER颗粒极化引起的相互作用力，因此，ER颗粒作为ERE的分散相，在电场作用下主导了ERE黏弹性的变化。

ER颗粒在ER材料中起着重要的作用，因为它们在电场中的极化和相互作用是ER效应的主要原因。因此，合成性能优异的ER颗粒是一个重要的研究方向。Yuan等[117]以具有GER效应的颗粒为分散相、以PDMS为分散相、以硅油为增塑剂制备ERE。采用改进的共沉淀法制备了包覆极性分子层(尿素)的 $BaTiO(C_2O_4)_2$ 颗粒。制备得到的ERE相对ER效应很高，在 $3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 电场下，ERE的存储模量比无电场作用下提高了3280%。有研究指出，颗粒的极性分子外层有利于增强ER效应，这是含GER颗

粒弹性体具有优异ER性能的部分原因。Niu等[112]研究了包覆尿素的 $TiO_2$ 颗粒填充的ERE，结果表明，颗粒的极性分子外层有利于ER效应的增强。

在颗粒表面改性方面，Dong等[113]采用3-(三甲氧基硅基)甲基丙烯酸丙酯和三乙氧基乙烯基硅烷两种硅烷偶联剂对 $TiO_2$ 颗粒进行改性。与裸露的 $TiO_2$ 颗粒相比，改性后的 $TiO_2$ 颗粒与硅橡胶结合得更好，提高了ERE的存储模量和相对ER效应。

与ERF类似，不同的颗粒形貌对ERE的力学性能有很大的影响。Gao等[115]从颗粒形状和结构的角度出发，在Ba-乙二胺四乙酸(EDTA)螯合前驱体的辅助下，通过水热法制备了不同形貌的Mg掺杂 $BaTiO_3$ 颗粒，并调节了反应温度和pH值。亲水性顺序为海胆状>坑洼状>球状；介电常数顺序为坑洼状>球状>海胆状。根据介质极化机制，颗粒的不对称形貌和晶体缺陷增加了颗粒在电场中的极化率，因此具有最高不对称和晶体缺陷的坑洼状颗粒具有最高的介电常数。对比在有电场和无电场条件下填充 $BaTiO_3$ 含量为1% (质量分数)的弹性体的剪切储能模量，结果表明，坑洼状填充和海胆状 $BaTiO_3$ 填充的弹性体的储能模量增量高于球状 $BaTiO_3$ 填充的弹性体。图10 [116]为采用自组装方法合成的具有核壳结构的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)@ $BaTiO_3$ 颗粒，其中 $BaTiO_3$ 颗粒与经硅烷偶联剂修饰的PMMA微球结合，通过控制 $BaTiO_3$ 与PMMA的质量比，合成了具有不同 $BaTiO_3$ 含量和核壳结构的PMMA@ $BaTiO_3$ 。然后，成功制备了颗粒含量为1%的PMMA@ $BaTiO_3$ /明胶/水弹性体。然而，在这两项关于颗粒形状和结构的研究中，为了有针对性地探讨颗粒形状和结构对ERE的ER性能的影响，有必要测试电场下ERE的储能模量并计算得到相对ER效应。颗粒形状和结构的变化会导致颗粒介电性能的变化，从而影响颗粒对电场的响应。迄今为止，一些研究表明，通过获得具有新颖形状和结构的颗粒，可以显著改善ERE的ER性能。颗粒几何和结构对ERE力学性能的影响主要是由于不同几何形态颗粒的介电常数不同。几何形状对ERE性能的影响还有待研究人员进一步探讨。

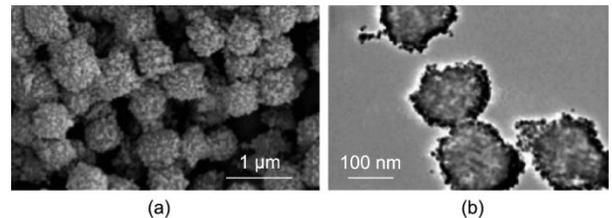


图10. 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)@ $BaTiO_3$ 颗粒的SEM图像(a)和TEM图像(b)。

连续相一般为弹性良好的聚合物，用于分散固体颗粒。与分散相颗粒相比，它具有小得多的介电常数和良好的绝缘性。常见的分散剂是硅橡胶（如PDMS [112–114]），一些研究也使用凝胶（如甘油/明胶[115–116]）。作为分散剂，弹性基体在无电场条件下的力学性能主要决定了ERE的初始力学性能和适用场景。通常，使用弹性模量较低的弹性体基体可以获得较高的力学性能百分比增量[118]，但在选择弹性基体时也应考虑其他性能的要求。

添加剂是用于调节弹性基体和填料中弹性体性能的成分。在ERE使用的添加剂中，硅油是最常用的增塑剂。加入硅油可以改善颗粒在基体中的分散状态，降低分散黏度，使颗粒更容易在弹性体基体内运动，有利于ERE在电场作用下的响应。

### 3.3. ERE的介观结构

根据颗粒分布的不同，ERE可分为各向同性和各向异性。各向同性ER颗粒均匀、随机地分布在基体中。各向异性ERE在固化过程中，颗粒被预先排列成近似平行于外加电场的方向，并且在基体固化后结构保持这种排列形式。

研究者研究了各向异性介观结构对ER性能的影响。Cao和Zhao [119]设计了一种层状介观结构的ERE，证明各向异性介观结构会显著影响ERE的可调刚度。弹性变形改变了介观结构的方向，从而改变了静电势能，在外加电场作用下产生可调节的刚度。通过理论计算和数值模拟[图11 (a)] [119]，他们调整了两种介质之间的厚度比 $H_1$ 、介电常数比 $H_0$ 、分层结构方向等参数，得到了最大的ER系数 $K_{ER}$ ，对应于电场作用下最大的可调刚度。选择PDMS作为基体，其他几种介电材料为填料，计算出在 $10 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场下可调模量大于 $300 \text{ kPa}$ 。结果表明，平行层状介观结构的ER系数最高。结果还表明，电场固化后得到的平行链结构有利于提高ER效应。Niu等[112]和Dong等[113]成功制备和研究了各向异性ERE。他们用一种特殊的模具在ERE的固化过程中施加了直流电场。图11 (b) [112]显示了用于在电场下固化弹性体的装置。

除了直流电场外，Kossi等[114]还尝试在固化ERE时使用交流电场。结果表明，在直流电场下固化的样品的ER性能比在交流电场和无电场下固化的样品强。上述结果表明，各向异性ERE比各向同性ERE具有更强的ER性能。2021年，本文研究团队使用包覆尿素层的钛氧基草酸钡纳米颗粒（BTRU）和PDMS制备了性能优异的各向异性ERE。在 $3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 下，相对ER效应最高为17160%，储能模量增量为 $5.2 \text{ MPa}$ 。目前该系统的性能在所有的ERE中是最好的。各向异性结构通过减小颗粒间沿电场方向的距离，可以有效地形成颗粒间的饱和表面极化，电场中极化颗粒间的静电相互作用得到有效增强。

### 3.4. ERE的应用

在外加电场作用下，由于颗粒的取向极化，ERE的剪切模量显著增强，ERE的应用大多处于剪切模式，即在电场作用下，力方向垂直于颗粒相互作用方向。Biggerstaff和Kosmatka [120]率先使用基于硅凝胶的ERE作为阻尼器。他们的研究表明，在外加电场的帮助下，ERE的刚度可以变化到初始值的6倍，阻尼系数可以变化到初始值的三分之一。Wei等[121]设计了ERE夹层梁。通过建立有限元模型预测梁的振动响应，并通过实验分析，得出电场强度可以有效改变梁的振动特性，可应用在工程结构中。Koyanagi等[122]设计了一种结合ER凝胶的线性执行器。通过控制电场强度，调节ER凝胶与离合器之间的摩擦力，最大可传递 $10 \text{ N}$ 的力。直线驱动器非常适用于机器人领域。Zhu等[123]采用ERE设计了剪切型阻尼器，如图12 (a)所示。通过施加电场调节阻尼器的刚度和阻尼特性，获得了较好的阻尼效果。Ma等[124]也利用ERE设计了剪切模态阻尼器，如图12 (b)所示。结果表明，在外加电场作用下，阻尼器的力-位移滞回曲线是可调的，并可通过所建立的力学模型进行预测。Yuan等[117]利用ERE设计了调节圆周运动幅度的装置，如图12 (c)所示。在调整开/关电场的操作下，圆周运动相应产生还原和恢复的变化，证明了施加电场在类似条件下应用的可行性。此外，Zhou等[125]利用高性能各向异性ERE设计并

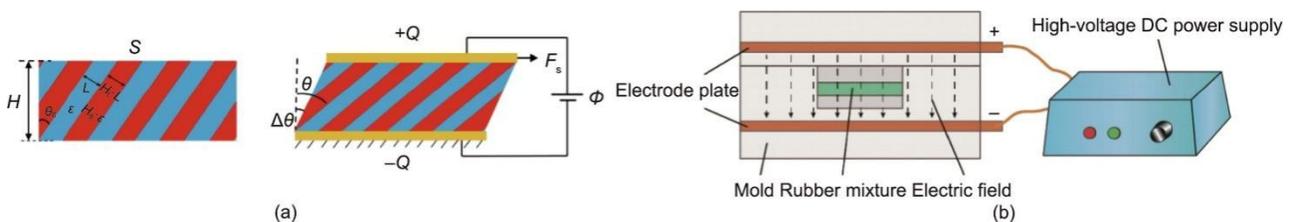


图11. (a) 未变形时ERE的层状结构（左）和在外加电场和剪切力作用下ERE的结构变化（右）。(b) 施加直流电场制备各向异性ERE的示意图。 $H_1$ : 厚度比;  $H_0$ : 介电常数比;  $A$ : 表面积;  $H$ : 厚度;  $\Phi$ : 外部电压;  $F_s$ : 剪切力;  $\Delta\theta$ : 剪切应变;  $\pm Q$ : 表面电荷量;  $\epsilon$ 和 $H_0 \cdot \epsilon$ 为弹性体中两相的介电常数;  $L$ 和 $H_1 \cdot L$ 为弹性体中两相的厚度;  $\theta_0$ 和 $\theta$ 为ERE在不同状态下的角度。

制造了软硬可调的智能乒乓球拍[图12(d)]。球拍可以通过调节外加电场来改变乒乓球的击球角度和速度,非常适合乒乓球运动员的非常规和适应性训练。

综上所述,ERE在剪切模式下得到了广泛的应用,其阻尼装置结构的改进和创新是应用领域的主要发展方向,但在压缩模式下的应用也值得继续探究。

## 4. ER技术在其他领域的应用

由于ER效应的独特特性,在外加电场的条件下,分散相形成链状。通过调整电场方向,不仅可以调节悬浮液的黏度,还可以改变体系的折射率和电导率。因此,ER技术的应用范围非常广泛。除了ERF和ERE的常见用途外,该技术还可以应用于许多其他领域,如石油运输[21]、食品加工[22]、电容器[25]、能源技术[23]和新型传感器[126]等。

### 4.1. ER技术降低黏度

利用ER技术降低流体黏度的方法最先应用在原油输送中。2006年,研究者基于ER效应提出了一种新的原油输送方法,通过在原油流动方向施加电场来降低原油黏

度,以降低输送能耗,提高输送效率[24,127]。与传统的通过加热方式输送原油相比,微纳米技术不仅适用于多种原油,而且在低温环境下能耗极低[21]。例如,当环境温度 $-3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,Tao等[21]采用该技术使一桶原油的黏度降低了82.1%,耗电量仅为 $0.1025\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。此外,他们还通过中子散射实验证明了原油电场方向的黏度降低是由于原油中的纳米颗粒沿电场方向呈链状排列[21]。与上述设计的设备类似,Du等[128]利用外电场降低含硫纳米颗粒柴油的表观黏度,从而提高柴油的雾化程度,最终达到提高燃烧和发动机效率的目的。

上述研究中使用的电场方向均与流动方向平行。为了评价电场方向与原油降黏效果之间的相关性,Huang等[129]改变了施加电场的方向,使电场方向垂直于含蜡原油的流动方向。在此条件下,测试了含蜡原油的流变性能随电场强度的变化。在垂直于原油流动方向、电场强度为 $5\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的电场作用下,原油黏度降低80%以上。这证明了含蜡原油的降黏效果与电场方向无关。因此,含蜡原油在外加电场作用下黏度的降低不能简单地归结为沿原油流动防线形成的介电组分链式结构[130]。他们从有无外加电场作用下原油电导率的变化推测,蜡颗粒的界面极化应该是蜡油流变行为的主要机制。具体来说,对于含蜡原

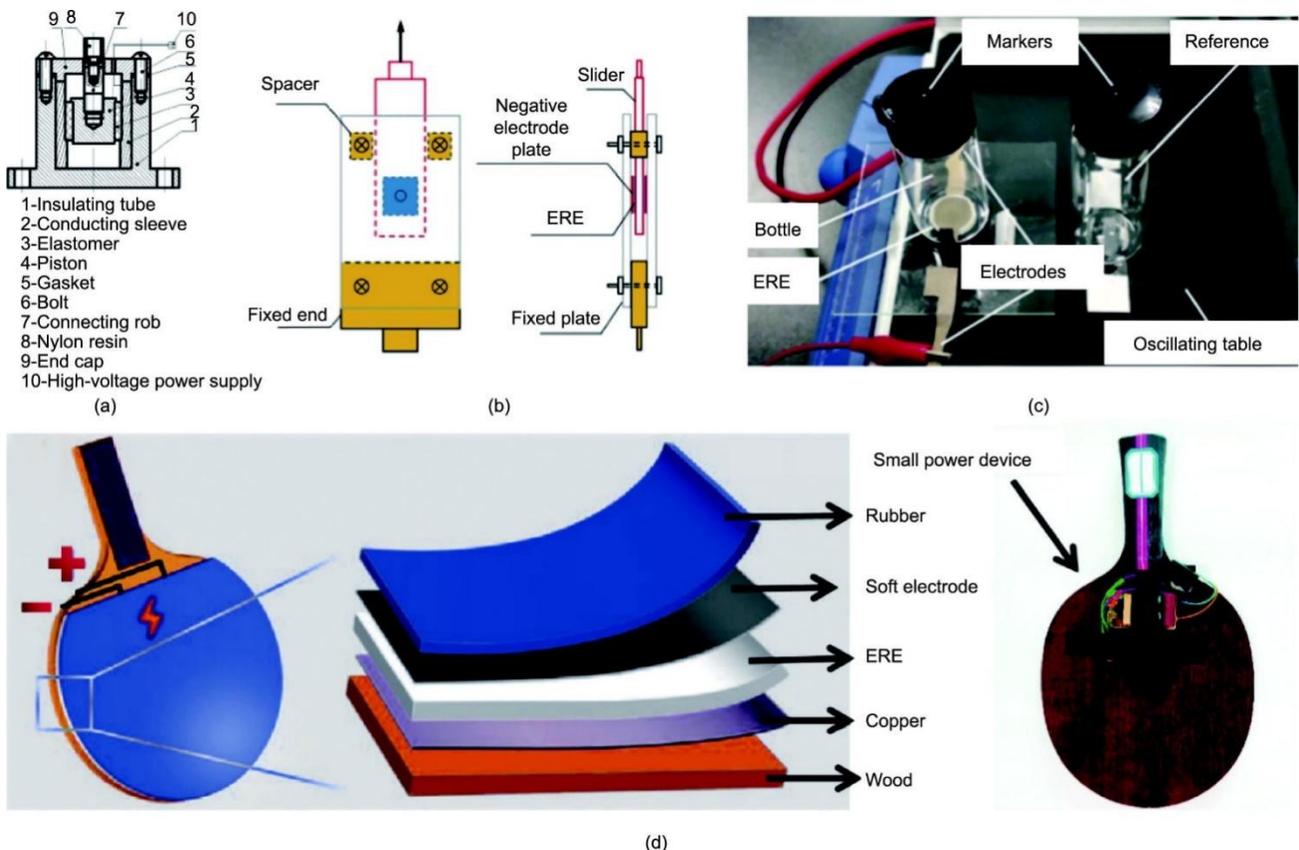


图12. (a) ERE减震器结构图。(b) ERE剪切型阻尼器结构图。(c) 调节圆周运动幅度的装置。(d) 智能乒乓球拍原理图及结构设计。

油体系，蜡颗粒对原油黏度的影响很大，这不仅与含蜡组分的黏度有关，还与它们之间的相互作用和结构有关。施加电场时，含蜡原油体系中的点状颗粒会聚集在蜡颗粒表面形成较大的团块，在静电斥力的作用下，原油体系中颗粒之间的范德瓦尔斯力会减小。原油结构强度的降低在宏观上表现为黏度的降低[131–132]。这种降低原油黏度的方法具有一定的时间效应。此外，原油的种类和环境温度也会对降黏效果产生一定的影响。虽然该方法具有大规模工业应用的良好前景，但未来还需要将该方法应用到实际的原油输送中，这需要具体分析原油的种类和施加电场的时机（位置、温度等）。

除原油运输外，通过ER技术降低流体黏度的方法也被应用于食品加工领域，如通过这种方法降低巧克力中的脂肪含量。虽然巧克力是一种美味的食物，受到很多人的喜爱，但不幸的是，巧克力产品含有大量的脂肪，对健康有害，容易导致肥胖。这个问题已经研究了很多年，但是没有合适的方法来降低巧克力的脂肪含量。这主要是因为融化的脂肪在巧克力的生产过程中起到了连续相的作用，使可可、糖、乳固体等颗粒均匀分散。如果减少脂肪含量，融化状的巧克力将无法继续存在，因为它的黏度会大大升高。Tao等[133]基于ER效应，利用外电场降低融化巧克力的黏度，从而使降低巧克力中的脂肪含量成为可能。沿着液体巧克力的流动方向施加电场，将可可粉颗粒聚集成微米大小的矩形颗粒[图13(a)] [21,133]。这种微

观结构的变化破坏了旋转对称性，降低了融化巧克力在流动方向上的黏度。这样，巧克力的脂肪含量就减少了10%~20%。这种利用ER效应在某些食品加工过程中降低黏度的方法是具有通用性的，并且可以通过简单的设备来实现。因此，在食品工业中具有广阔的应用前景。

#### 4.2. ER技术提高黏度

超级电容器不同于传统的化学电源。它是介于传统电容器和电池之间的具有特殊性能的电容器。超级电容器主要依靠双电层和氧化还原赝电容来存储电能。它们既具有电容器的快速充放电特性，又具有电池的储能特性[134]。然而，超级电容器应用的主要限制是由自放电引起的能量存储时间短，从而进一步导致存储能量的损失。Xia等[25]将向列液晶4-*n*-戊基-4'-氰联苯（5CB）加入超级电容器的电解液中，利用5CB的ER效应减少漏电，抑制自放电。当电容器充电时，5CB分子在电场作用下被迫移动和聚集，沿电场方向形成定向排列[图13(b)] [25]。流体的黏度可以通过外电场调节，并随着分子排列的改变而大大增强。当电容器充电时，电容器内流体的黏度会增加，这将阻碍离子扩散，从而导致泄漏电流的降低和抑制自放电。这有效地抑制了自放电过程中的电荷重分布和法拉动力学反应。

#### 4.3. 电场取向的全固态锂离子电池

具有优异性能的固体陶瓷聚合物电解质已成为极具吸

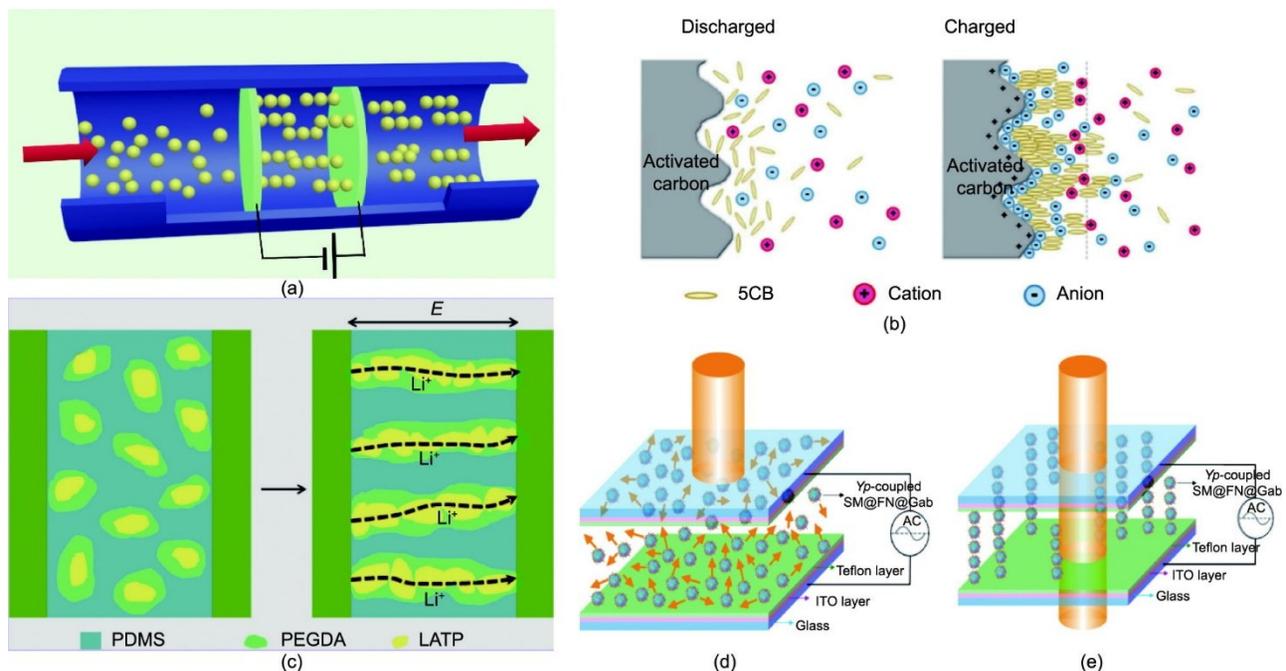


图13. (a) 施加电场降低原油或巧克力黏度示意图[21,133]。(b) 向列液晶4-*n*-戊基-4'-氰联苯（5CB）在电容器电解质中增加流体黏度的原理示意图。(c) LAMP@PEGDA电场平行排列示意图。LAMP:  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_0.3\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ ; PEGDA: 聚乙二醇二丙烯酸酯。无交变电场 (d) 或有交变电场 (e) 时ED中颗粒的微观排列示意图。SM: 聚苯乙烯微球; FN: 磁性纳米颗粒; Yp: 鼠疫耶尔森氏菌; Gab: 蛋白质G。

引力的材料[135]。一般来说, 固体聚合物电解质的制备过程复杂、繁琐。传统的溶液浇铸法消耗有机溶剂, 无溶剂热压法消耗能源[136]。因此, 高性能固体电解质聚合物的制备对能源领域有着巨大的影响。Liu等[23]提出了一种通过外部交流电场排列和组装无机颗粒的简单策略。在固体陶瓷聚合物电解质的制备过程中, 他们利用ER效应使陶瓷颗粒在外加电场的作用下沿电场方向分布。将聚合物固化后, 得到定向组装的固体陶瓷聚合物电解质。通过外电场的作用, 在 $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ 颗粒和聚乙二醇二丙烯酸酯(LATP@PEGDA)中形成排列的离子传导网络路径, 从而促进离子的运动, 提高离子的电导率[图13(c)] [23]。基于ER效应, 在制备过程中通过施加外电场的简单策略, 可以使复合电解质中的陶瓷颗粒排列形成高效的三维锂离子导电网络, 这对于高性能固体电解质的开发具有重要意义。

#### 4.4. 传感器的应用

ER传感器可以根据外加电场作用下ERF透射率的变化快速、直观地诊断疾病。Chou等[126]描述了一种用于鼠疫快速可视化诊断的ER传感器。他们首先用磁性纳米颗粒(FN)包覆聚苯乙烯微球(SM), 制备核壳结构微球SM@FN, 然后在SM@FN上包覆抗鼠疫耶尔森氏菌(*Y. pestis*, *Yp*)抗体(ab-*Yp*)作为生物传感介质。用两块带间隔层的氧化铟锡玻璃片形成ER显示器(ED), 以容纳ab-*Yp*修饰的微球溶液, 并观察透过率的变化。封装分散SM@FN溶液的ED是不透明的[图13(d)] [126]。在交变电场作用下, 基于ER效应, 颗粒会沿电场方向排列, 从而改变ED的透射率[图13(e)]。透射率达到最大值时的频率定义为特征频率( $f_c$ )。  $f_c$ 可以作为壳体材料的信号。当鼠疫抗原与颗粒上的特异性抗体偶联时, 颗粒的 $f_c$ 从200 kHz变化到750 kHz。这种较大的透射率变化可用于诊断没有荧光标记的*Yp*。当抗原浓度大于 $30 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 和 $40 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 时, 30 s即可检测到。与其他常用的免疫测定方法(包括二次免疫化学或酶联法)相比, 该方法简便、灵敏度高、选择性强, 有望成为鼠疫现场诊断的候选方法。

## 5. 总结与展望

本文以ER技术理论为基础, 结合最新研究成果(图14) [6,8,14,16-18,20,23-25,28-29,33-34,44,46,56,64-67,72-73,78-82,84-85,88,91,94,97-99,107-109,112-113,115-117,120-121,126,129,133], 介绍了ER材料的最新研究进展及相关应用。根据材料的主要成分对材料进行了分

类总结的介绍, 并阐述了提高ER材料性能的主要方法。本文应用部分主要介绍了ER技术在其他领域的应用, 这也是ER技术未来一个很好的发展方向。因为分散相的材料类型、介电和导电性能、颗粒尺寸、颗粒体积分数等对ERF的性能起着至关重要的作用, 所以目前对于ERF材料的研究和改进, 重点仍是对其分散相的研究。近年来, 研究人员发现颗粒的结构和几何形状对ERF有巨大的影响, 特别是由具有空心结构和棒状几何形状的颗粒制备的ERF, 其性能远远超过球形颗粒型ERF。因此, 对ERF分散相的粒径和形貌的研究成为一个研究热点。对ERF连续相的研究也非常重要。通过在硅油连续相中加入烷烃, 为双液相的GERF提供了提高综合性能的新方向。双液相GERF的ER效率达到10 656, 其黏度极低, 但稳定性仍然很好。

此外, 本文阐述了近年来ERE的研究进展, 介绍了ERE的组成、作用机理和应用, 并对近年来提高ERE性能的方法和方向进行了总结。ERE研究中的一个重要目标是提高应用性能, 即主要与分散相颗粒性质有关的储能模量增量和相对ER效应。极性分子层、表面修饰、颗粒的不对称形状和核壳结构可以改善ER性能, 在电场下固化得到的各向异性ERE也可以提高其ER效应。如果对这些现有方法进行改进或组合, 则可以获得性能更好的ERE。

储能模量增量和相对ER效应是评价ER材料性能的两个常用指标。当在实际生活中使用时, 需要测试许多其他性能, 如使用寿命和蠕变性能。ERE的发展历史没有ERF那么长, 因此, 颗粒之间复杂的相互作用以及颗粒与基体之间的相互作用还没有被清楚地认识, 需要进行研究和讨论。ERE具有刚度可调的优点, 没有结块和漏电等问题, 并且比ERF更容易进行应用结构设计。ERE的剪切模式已经在应用中被广泛使用, 而更好的结构设计和开发ERE器件新的使用模式也是一个值得研究的方向。

ER效应和技术已经发现和发展的八十多年, ER材料的性能在这几十年间得到不断的提高。同时, 关于它们的应用和相关器件也有很多演示和扩展。例如, 在ER智能阻尼器领域有很多商业应用案例, 在能源领域有原油输送等范例。但目前这些应用成果还停留在应用示范的层面, 尚未得到大规模推广应用。在材料方面, ER材料的稳定性、温度适应性和耐磨性制约了其在工程领域的应用。对于实际工程应用而言, ER材料的封装、使用过程中电极的适用性、器件材料的选择等都是有待解决的难题。此外, 制约其应用的原因除了ER材料的一些性能缺陷和应用技术不成熟外, 还与应用定位和开发有关。因此, 可以建立包括合成工艺、成分、材料性能、使用性能和应用数

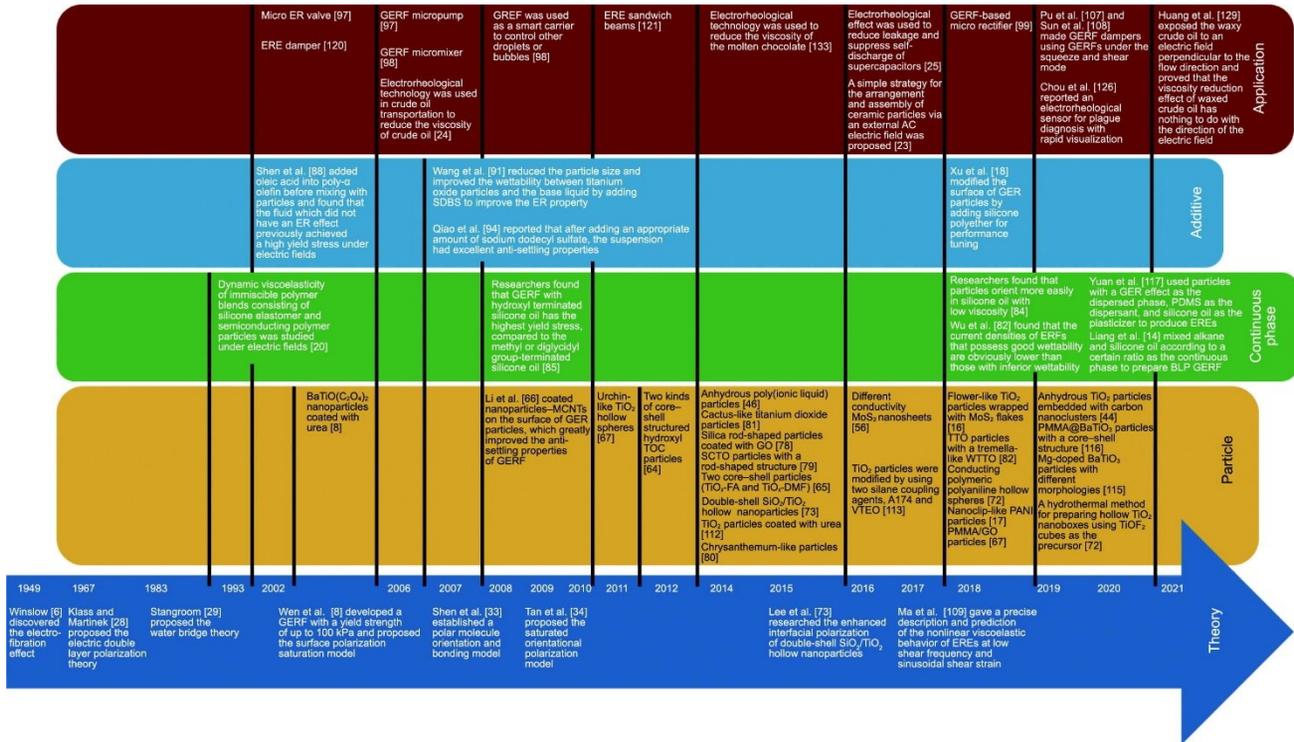


图 14. 本文以ER技术理论为基础，结合最新研究成果，介绍了ER材料的最新研究进展及相关应用。

据在内的ER材料数据库以帮助研发。新材料的研究和开发应该以实际应用为导向，这些过程可以通过基于人工智能的计算机技术如数据挖掘来加速。如果缺乏合理的应用定位，那么对新材料的无方向探索就会造成不必要的浪费。因此，要发展ER技术并扩大其应用范围，还需要投入更多的资源进行应用层面的定位和研究。

## 致谢

感谢之江实验室重点研究项目(2021PE0AC02)和国家自然科学基金项目(11704239、61922053、11674210)对本研究的经费支持。

## Compliance with ethics guidelines

Yudai Liang, Dongyang Huang, Xuefeng Zhou, Ziqiu Wang, Quan Shi, Yaying Hong, Huayan Pu, Mengying Zhang, Jinbo Wu, and Weijia Wen declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Hao T. Electrorheological fluids. *Adv Mater* 2001;13(24):1847–57.
- [2] Korobko EV, Matsepuro AD. Electrorheology: from its beginning to the present. *J Eng Phys Thermophys* 2010;83(4):707–14.
- [3] Sheng P, Wen W. Electrorheological fluids: mechanisms, dynamics, and microfluidics applications. *Annu Rev Fluid Mech* 2012;44(1):143–74.
- [4] Dong YZ, Seo Y, Choi HJ. Recent development of electro-responsive smart electrorheological fluids. *Soft Matter* 2019;15(17):3473–86.
- [5] Wu H, Xu ZC, Wu JB, Wen WJ. Research progress of field-induced soft smart materials. *Int J Mod Phys B* 2018;32(18):1840010.
- [6] Winslow WM. Induced fibrillation of suspensions. *J Appl Phys* 1949;20(12):1137–40.
- [7] Lvkov AV, editor. Electrorheological effect. Minsk: Nauka i tekhnika; 1972. Russian.
- [8] Wen W, Huang X, Yang S, Lu K, Sheng P. The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles. *Nat Mater* 2003;2(11):727–30.
- [9] Sadeghi A, Beccai L, Mazzolai B. Innovative soft robots based on electrorheological fluids. In: Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS); 2012 Oct 7 – 12; Vilamoura-Algarve, Portugal. Piscataway: IEEE; 2012. p. 4237–42.
- [10] Miyoshi T, Yoshida K, Kim JW, Eom SI, Yokota S. An MEMS-based multiple electro-rheological bending actuator system with an alternating pressure source. *Sens Actuators A Phys* 2016;245:68–75.
- [11] Wang L, Yang Y, Chen Y, Majidi C, Iida F, Askounis E, et al. Controllable and reversible tuning of material rigidity for robot applications. *Mater Today* 2018; 21(5):563–76.
- [12] Xu Z, Wu H, Zhang M, Wu J, Wen W. The research progress of electrorheological fluids. *Chin Sci Bull* 2017;62(21):2358–71.
- [13] Qiu Z, Huang J, Shen R, Wang Y, Wu X, Lu K, et al. The role of adsorbed water on  $\text{TiO}_2$  particles in the electrorheological effect. *AIP Adv* 2018;8(10):105319.
- [14] Liang Y, Yuan X, Wang L, Zhou X, Ren X, Huang Y, et al. Highly stable and efficient electrorheological suspensions with hydrophobic interaction. *J Colloid Interface Sci* 2020;564:381–91.
- [15] Yoon CM, Jang Y, Noh J, Kim J, Lee K, Jang J. Enhanced electrorheological performance of mixed silica nanomaterial geometry. *ACS Appl Mater Interfaces* 2017;9(41):36358–67.
- [16] He K, Wen Q, Wang C, Wang B, Yu S, Hao C, et al. A facile synthesis of hierarchical flower-like  $\text{TiO}_2$  wrapped with  $\text{MoS}_2$  sheets nanostructure for enhanced electrorheological activity. *Chem Eng J* 2018;349:416–27.
- [17] Wen Q, He K, Wang C, Wang B, Yu S, Hao C, et al. Clip-like polyaniline nanofibers synthesized by an *in-situ* chemical oxidative polymerization and its

- strong electrorheological behavior. *Synth Met* 2018;239:1–12.
- [18] Xu Z, Hong Y, Zhang M, Wu J, Wen W. Performance tuning of giant electrorheological fluids by interfacial tailoring. *Soft Matter* 2018; 14(8): 1427–33.
- [19] Dong X, Niu C, Qi M. Electrorheological elastomers. In: Cankava N, editor. *Elastomers*. Rijeka: INTECH; 2017. p. 3–19.
- [20] Shiga T, Okada A, Kurauchi T. Electroviscoelastic effect of polymer blends consisting of silicone elastomer and semiconducting polymer particles. *Macromolecules* 1993;26(25):6958–63.
- [21] Tao R, Du E, Tang H, Xu X. Neutron scattering studies of crude oil viscosity reduction with electric field. *Fuel* 2014;134:493–8.
- [22] Tao R, Tang H, Tawhid-Al-Islam K, Du E, Kim J. Electrorheology leads to healthier and tastier chocolate. *Proc Natl Acad Sci USA* 2016; 113(27): 7399–402.
- [23] Liu X, Peng S, Gao S, Cao Y, You Q, Zhou L, et al. Electric-field-directed parallel alignment architecting 3D lithium-ion pathways within solid composite electrolyte. *ACS Appl Mater Interfaces* 2018;10(18):15691–6.
- [24] Tao R, Xu X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. *Energy Fuels* 2006;20(5):2046–51.
- [25] Xia M, Nie J, Zhang Z, Lu X, Wang ZL. Suppressing self-discharge of supercapacitors via electrorheological effect of liquid crystals. *Nano Energy* 2018;47:43–50.
- [26] Zhang M, Wang L, Wang X, Wu J, Li J, Gong X, et al. Microdroplet-based universal logic gates by electrorheological fluid. *Soft Matter* 2011; 7(16): 7493–7.
- [27] Agafonov AV, Zakharov AG. Electrorheological fluids. *Russ J Gen Chem* 2010; 80(3):567–75.
- [28] Klass DL, Martinek TW. Electroviscous fluids. I. Rheological properties. *J Appl Phys* 1967;38(1):67–74.
- [29] Stangroom JE. Electrorheological fluids. *Phys Technol* 1983;14(6):290–6.
- [30] Block H, Kelly JP. Electro-rheology. *J Phys D Appl Phys* 1988;21(12):1661–77.
- [31] Ma H, Wen W, Tam WY, Sheng P. Frequency dependent electrorheological properties: origin and bounds. *Phys Rev Lett* 1996;77(12):2499–502.
- [32] Wang X, Shen R, Wen W, Lu K. High performance calcium titanate nanoparticle ER fluids. *Int J Mod Phys B* 2005;19(7–9):1110–3.
- [33] Shen R, Wang X, Lu Y, Sun G, Wen W, Lu K. The methods for measuring shear stress of polar molecule dominated ER fluids. *J Appl Phys* 2007;102(2):024106.
- [34] Tan P, Tian WJ, Wu XF, Huang JY, Zhou LW, Huang JP. Saturated orientational polarization of polar molecules in giant electrorheological fluids. *J Phys Chem B* 2009;113(27):9092–7.
- [35] Choi K, Gao CY, Nam JD, Choi HJ. Cellulose-based smart fluids under applied electric fields. *Materials* 2017;10(9):1060.
- [36] Hong CH, Choi HJ, Seo Y. Comment on “Transient overshoot of the electrorheological responses of conducting polymer-coated polyethylene suspensions in mineral oil”. *Synth Met* 2008;158(1–2):72–4.
- [37] Seo YP, Seo Y. Modeling and analysis of electrorheological suspensions in shear flow. *Langmuir* 2012;28(6):3077–84.
- [38] Seo YP, Han S, Choi J, Takahara A, Choi HJ, Seo Y. Searching for a stable high-performance magnetorheological suspension. *Adv Mater* 2018;30(42):1704769.
- [39] Cho MS, Choi HJ, Jhon MS. Shear stress analysis of a semiconducting polymer based electrorheological fluid system. *Polymer* 2005;46(25):11484–8.
- [40] Lu Q, Han WJ, Choi HJ. Smart and functional conducting polymers: application to electrorheological fluids. *Molecules* 2018;23(11):2854.
- [41] Liu YD, Choi HJ. Electrorheological fluids: smart soft matter and characteristics. *Soft Matter* 2012;8(48):11961–78.
- [42] Do T, Ko YG, Chun Y, Jung Y, Choi US, Park YS, et al. Switchable electrorheological activity of polyacrylonitrile microspheres by thermal treatment: from negative to positive. *Soft Matter* 2018;14(44):8912–23.
- [43] Kuznetsov NM, Belousov SI, Kamyshinsky RA, Vasiliev AL, Chvalun SN, Yudin EB, et al. Detonation nanodiamonds dispersed in polydimethylsiloxane as a novel electrorheological fluid: effect of nanodiamonds surface. *Carbon* 2021;174:138–47.
- [44] Qiu Z, Shen R, Huang J, Lu K, Xiong X. A giant electrorheological fluid with a long lifetime and good thermal stability based on TiO<sub>2</sub> inlaid with nanocarbons. *J Mater Chem C* 2019;7(19):5816–20.
- [45] Liang Y, Liu Y, Zhou Y, et al. Efficient and stable electrorheological fluids based on chestnut-like cobalt hydroxide coupled with surface-functionalized carbon dots. *Soft Matter* 2022;18(20):3845–55.
- [46] Dong Y, Yin J, Zhao X. Microwave-synthesized poly(ionic liquid) particles: a new material with high electrorheological activity. *J Mater Chem A* 2014;2(25): 9812–9.
- [47] He F, Wang B, Zhao J, Zhao X, Yin J. Influence of tethered ions on electric polarization and electrorheological property of polymerized ionic liquids. *Molecules* 2020;25(12):2896.
- [48] Zhao J, Lei Q, He F, Zheng C, Liu Y, Zhao X, et al. Nonmonotonic influence of size of quaternary ammonium counteranions on micromorphology, polarization, and electroresponse of anionic poly(ionic liquid)s. *J Phys Chem B* 2020;124(14):2920–9.
- [49] Zhao J, Lei Q, He F, Zheng C, Zhao X, Yin J. Influence of geometry of mobile counteranions on conductivity, polarization and electrorheological effect of polymeric anionic liquids at ice point temperature. *Polymer* 2020;205:122826.
- [50] Zhang WL, Liu YD, Choi HJ. Graphene oxide coated core–shell structured polystyrene microspheres and their electrorheological characteristics under applied electric field. *J Mater Chem* 2011;21(19):6916–21.
- [51] Zhang WL, Liu YD, Choi HJ, Seo Y. Core–shell structured graphene oxide-adsorbed anisotropic poly (methyl methacrylate) microparticles and their electrorheology. *RSC Adv* 2013;3(29):11723–31.
- [52] Kim SD, Zhang WL, Choi HJ. Pickering emulsion-fabricated polystyrene–graphene oxide microspheres and their electrorheology. *J Mater Chem C* 2014; 2(36):7541–6.
- [53] Kutalkova E, Mrlík M, Ilčíková M, Osicka J, Sedláček M, Mosnáček J. Enhanced and tunable electrorheological capability using surface initiated atom transfer radical polymerization modification with simultaneous reduction of the graphene oxide by silyl-based polymer grafting. *Nanomaterials* 2019;9(2):308.
- [54] Wang J, Sun H, Yang Z, Wang Y, Zhao X, Yin J. Improved electrorheological polishing property of poly(ionic liquid)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite particles prepared via Pickering emulsion polymerization. *ACS Appl Polym Mater* 2021;3(11):5778–87.
- [55] Zhang WL, Choi HJ. Fabrication and electrorheology of graphene oxide/ionic N-substituted copolyaniline composite. *Colloid Polym Sci* 2013;291(6):1401–8.
- [56] Lee S, Kim YK, Hong JY, Jang J. Electro-response of MoS<sub>2</sub> nanosheets-based smart fluid with tailorable electrical conductivity. *ACS Appl Mater Interfaces* 2016;8(36):24221–9.
- [57] Hwang JK, Shin K, Lim HS, Cho JC, Kim JW, Suh KD. The effects of particle conductivity on the electrorheological properties of functionalized MCNT-coated doublet-shaped anisotropic microspheres. *Macromol Res* 2012; 20(4): 391–6.
- [58] Lengálová A, Pavlínek V, Sába P, Quadrat O, Kitano T, Stejskal J. Influence of particle concentration on the electrorheological efficiency of polyaniline suspensions. *Eur Polym J* 2003;39(4):641–5.
- [59] Tian Y, Meng Y, Wen S. Particulate volume effect in suspensions with strong electrorheological response. *Mater Lett* 2003;57(19):2807–11.
- [60] Song Z, Cheng Y, Wu J, Guo J, Xu G. Influence of volume fraction on the yield behavior of giant electrorheological fluid. *Appl Phys Lett* 2012;101(10):101908.
- [61] Wen W, Huang X, Sheng P. Particle size scaling of the giant electrorheological effect. *Appl Phys Lett* 2004;85(2):299–301.
- [62] Wu CW, Conrad H. Influence of mixed particle size on electrorheological response. *J Appl Phys* 1998;83(7):3880–4.
- [63] Chuah WH, Zhang WL, Choi HJ, Seo Y. Magnetorheology of core–shell structured carbonyl iron/polystyrene foam microparticles suspension with enhanced stability. *Macromolecules* 2015;48(19):7311–9.
- [64] Wu J, Xu G, Cheng Y, Liu F, Guo J, Cui P. The influence of high dielectric constant core on the activity of core–shell structure electrorheological fluid. *J Colloid Interface Sci* 2012;378(1):36–43.
- [65] Wu J, Jin T, Liu F, Guo J, Cheng Y, Xu G. Formamide-modified titanium oxide nanoparticles with high electrorheological activity. *RSC Adv* 2014; 4(56): 29622–8.
- [66] Li J, Gong X, Chen S, Wen W, Sheng P. Giant electrorheological fluid comprising nanoparticles: carbon nanotube composite. *J Appl Phys* 2010; 107(9):093507.
- [67] Min TH, Lee CJ, Choi HJ. Pickering emulsion polymerized core–shell structured poly(methyl methacrylate)/graphene oxide particles and their electrorheological characteristics. *Polym Test* 2018;66:195–202.
- [68] Cheng Q, Pavlínek V, He Y, Yan Y, Li C, Saha P. Synthesis and electrorheological characteristics of sea urchin-like TiO<sub>2</sub> hollow spheres. *Colloid Polym Sci* 2011;289(7):799–805.
- [69] Gao CY, Meng LY, Piao SH, Choi HJ. Hollow submicron-sized spherical conducting polyaniline particles and their suspension rheology under applied electric fields. *Polymer* 2018;140:80–8.
- [70] Sung BH, Choi US, Jang HG, Park YS. Novel approach to enhance the dispersion stability of ER fluids based on hollow polyaniline sphere particle. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 2006;274(1–3):37–42.
- [71] Sedláček M, Mrlík M, Pavlínek V, Sába P, Quadrat O. Electrorheological properties of suspensions of hollow globular titanium oxide/polypyrrole particles. *Colloid Polym Sci* 2012;290(1):41–8.

- [72] Li C, He K, Sun W, Wang B, Yu S, Hao C, et al. Synthesis of hollow TiO<sub>2</sub> nanobox with enhanced electrorheological activity. *Ceram Int* 2020; 46(10): 14573–82.
- [73] Lee S, Lee J, Hwang SH, Yun J, Jang J. Enhanced electroresponsive performance of double-shell SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> hollow nanoparticles. *ACS Nano* 2015; 9(5):4939–49.
- [74] Yoon CM, Cho KH, Jang Y, Kim J, Lee K, Yu H, et al. Synthesis and electroresponse activity of porous polypyrrole/silica–titania core/shell nanoparticles. *Langmuir* 2018;34(51):15773–82.
- [75] Gwon H, Park S, Lee S. Ecoresorbable smart fluids with controlled electroresponsive properties by various metal doping. *J Mater Chem C* 2020; 8(44):15751–8.
- [76] Park S, Gwon H, Lee S. Electroresponsive performances of ecoresorbable smart fluids consisting of various plant-derived carrier liquids. *Chem Eur J* 2021;27(55):13739–47.
- [77] Hong JY, Choi M, Kim C, Jang J. Geometrical study of electrorheological activity with shape-controlled titania-coated silica nanomaterials. *J Colloid Interface Sci* 2010;347(2):177–82.
- [78] Lee S, Yoon CM, Hong JY, Jang J. Enhanced electrorheological performance of a graphene oxide-wrapped silica rod with a high aspect ratio. *J Mater Chem C* 2014;2(30):6010–6.
- [79] Wu J, Jin T, Liu F, Guo J, Cui P, Cheng Y, et al. Preparation of rod-like calcium titanyl oxalate with enhanced electrorheological activity and their morphological effect. *J Mater Chem C* 2014;2(28):5629.
- [80] Dong X, Ma N, Yang H, Han B, Qi M. The contribution of friction to electrorheological properties of a chrysanthemum-like particle suspension. *RSC Adv* 2015;5(91):74656–63.
- [81] Wang Z, Song X, Wang B, Tian X, Hao C, Chen K. Bionic cactus-like titanium oxide microspheres and its smart electrorheological activity. *Chem Eng J* 2014; 256:268–79.
- [82] Wu J, Zhang L, Xin X, Zhang Y, Wang H, Sun A, et al. Electrorheological fluids with high shear stress based on wrinkly tin titanyl oxalate. *ACS Appl Mater Interfaces* 2018;10(7):6785–92.
- [83] Wu J, Song Z, Liu F, Guo J, Cheng Y, Ma S, et al. Giant electrorheological fluids with ultrahigh electrorheological efficiency based on a micro/nano hybrid calcium titanyl oxalate composite. *NPG Asia Mater* 2016;8(11): e322.
- [84] Roman C, Garcia-Morales M, Goswami S, Marques AC, Cidade MT. The electrorheological performance of polyaniline-based hybrid particles suspensions in silicone oil: influence of the dispersing medium viscosity. *Smart Mater Struct* 2018;27(7):075001.
- [85] Gong X, Wu J, Huang X, Wen W, Sheng P. Influence of liquid phase on nanoparticle-based giant electrorheological fluid. *Nanotechnology* 2008;19(16): 165602.
- [86] Ma N, Dong X. Effect of carrier liquid on electrorheological performance and stability of oxalate group-modified TiO<sub>2</sub> suspensions. *J Wuhan Univ Technol* 2017;32(4):854–61.
- [87] Hong Y, Wen W. Influence of carrier liquid on nanoparticle-based giant electrorheological fluid. *J Intell Mater Syst Struct* 2016;27(7):866–71.
- [88] Shen C, Wen W, Yang S, Sheng P. Wetting-induced electrorheological effect. *J Appl Phys* 2006;99(10):106104.
- [89] Wei J, Zhao L, Peng S, Shi J, Liu Z, Wen W. Wettability of urea-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles and their high electrorheological effects. *J Sol Gel Sci Technol* 2008;47(3):311–5.
- [90] Wang B, Zhou M, Rozynek Z, Fossum JO. Electrorheological properties of organically modified nanolayered laponite: influence of intercalation, adsorption and wettability. *J Mater Chem* 2009;19:1816–28.
- [91] Wang BX, Zhao Y, Zhao XP. The wettability, size effect and electrorheological activity of modified titanium oxide nanoparticles. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 2007;295(1–3):27–33.
- [92] Palmer M, Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: impact, removal and future techniques: a critical review. *Water Res* 2018;147:60–72.
- [93] McIntyre C, Yang H, Green PF. Electrorheology of suspensions containing interfacially active constituents. *ACS Appl Mater Interfaces* 2013; 5(18): 8925–31.
- [94] Qiao Y, Yin J, Zhao X. Oleophilicity and the strong electrorheological effect of surface-modified titanium oxide nano-particles. *Smart Mater Struct* 2007;16(2): 332–9.
- [95] Xu H, Wu J, Hong Y, Wen W. The surfactant effect on electrorheological performance and colloidal stability. *Soft Matter* 2021;17(30):7158–67.
- [96] Manz A, Graber N, Widmer HM. Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing. *Sens Actuators B Chem* 1990; 1(1–6): 244–8.
- [97] Niu X, Wen W, Lee YK. Electrorheological-fluid-based microvalves. *Appl Phys Lett* 2005;87(24):243501.
- [98] Niu X, Liu L, Wen W, Sheng P. Hybrid approach to high-frequency microfluidic mixing. *Phys Rev Lett* 2006;97(4):044501.
- [99] Liu L, Chen X, Niu X, Wen W, Sheng P. Electrorheological fluid-actuated microfluidic pump. *Appl Phys Lett* 2006;89(8):083505.
- [100] Huo X, Yossifon G. Tunable electrorheological fluid microfluidic rectifier: irreversibility of viscous flow due to spatial asymmetry induced memory effects. *Phys Rev Lett* 2019;123(19):194502.
- [101] Niu X, Zhang M, Wu J, Wen W, Sheng P. Generation and manipulation of “smart” droplets. *Soft Matter* 2009;5(3):576–81.
- [102] Zhang M, Wu J, Niu X, Wen W, Sheng P. Manipulations of microfluidic droplets using electrorheological carrier fluid. *Phys Rev E* 2008;78(6):066305.
- [103] Wang L, Zhang M, Li J, Gong X, Wen W. Logic control of microfluidics with smart colloid. *Lab Chip* 2010;10(21):2869–74.
- [104] Wu J, Wen W, Sheng P. Smart electroresponsive droplets in microfluidics. *Soft Matter* 2012;8(46):11589–99.
- [105] Hasheminejad SM, Cheraghi M, Jamalpoor A. Active damping of sound transmission through an electrorheological fluid-actuated sandwich cylindrical shell. *J Sandw Struct Mater* 2020;22(3):833–65.
- [106] Zhao YL, Xu ZD. A hysteretic model considering Stribeck effect for small-scale magnetorheological damper. *Smart Mater Struct* 2018;27(6):065021.
- [107] Pu H, Huang Y, Sun Y, Wang M, Yuan S, Kong Z, et al. Design and experiment of bio-inspired GER fluid damper. *Sci China Inf Sci* 2020;63(7):170206.
- [108] Sun Y, Huang Y, Wang M, Wu J, Yuan S, Ding J, et al. Design, testing and modelling of a tuneable GER fluid damper under shear mode. *Smart Mater Struct* 2020;29(8):085011.
- [109] Ma N, Zhang Z, Dong X, Wang Q, Niu C, Han B. Dynamic viscoelasticity and phenomenological model of electrorheological elastomers. *J Appl Polym Sci* 2017;134(41):45407.
- [110] Niu C, Dong X, Qi M. Damping mechanism and theoretical model of electrorheological elastomers. *Soft Matter* 2017;13(32):5409–20.
- [111] Shen R, Wang X, Lu Y, Wang D, Sun G, Cao Z, et al. Polar-molecule-dominated electrorheological fluids featuring high yield stresses. *Adv Mater* 2009;21(45):4631–5.
- [112] Niu C, Dong X, Qi M. Enhanced electrorheological properties of elastomers containing TiO<sub>2</sub>/urea core–shell particles. *ACS Appl Mater Interfaces* 2015; 7(44):24855–63.
- [113] Dong X, Niu C, Qi M. Enhancement of electrorheological performance of electrorheological elastomers by improving TiO<sub>2</sub> particles/silicon rubber interface. *J Mater Chem C* 2016;4(28):6806–15.
- [114] Kossi A, Bossis G, Persello J. Electro-active elastomer composites based on doped titanium dioxide. *J Mater Chem C* 2015;3(7):1546–56.
- [115] Gao L, Zhan L, Liu W, Zhang Y, Xie Z, Ren J. Preparation and electro responsive properties of Mg-doped BaTiO<sub>3</sub> with novel morphologies. *J Mater Sci Mater Electron* 2019;30(13):12107–12.
- [116] Liu W, Xie Z, Lu Y, Gao M, Zhang W, Gao L. Fabrication and excellent electroresponsive properties of ideal PMMA@BaTiO<sub>3</sub> composite particles. *RSC Adv* 2019;9(22):12404–14.
- [117] Yuan X, Zhou X, Liang Y, Wang L, Chen R, Zhang M, et al. A stable high-performance isotropic electrorheological elastomer towards controllable and reversible circular motion. *Compos Part B Eng* 2020;193:107988.
- [118] Sakurai R, See H, Saito T, Sumita M. Effect of matrix viscoelasticity on the electrorheological properties of particle suspensions. *J Non-Newton Fluid Mech* 1999;81(3):235–50.
- [119] Cao C, Zhao X. Tunable stiffness of electrorheological elastomers by designing mesostructures. *Appl Phys Lett* 2013;103(4):041901.
- [120] Biggerstaff JM, Kosmatka JB. Electroviscoelastic materials as active dampers. In: Bar-Cohen Y, editor. *Proceedings of SPIE 4695, Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*; 2002 Jul 11; San Diego, CA, USA. Bellingham: International Society for Optics and Photonics (SPIE); 2002. p. 345–50.
- [121] Wei K, Bai Q, Meng G, Ye L. Vibration characteristics of electro-rheological elastomer sandwich beams. *Smart Mater Struct* 2011;20(5): 055012.
- [122] Koyanagi K, Yamaguchi T, Kakinuma Y, Anzai H, Sakurai K, Oshima T. Basic research of electro-rheological gel drum for novel linear actuator. *J Phys Conf Ser* 2009;149:012020.
- [123] Zhu SS, Qian XP, He H, Zhang QF. Experimental research about the application of ER elastomer in the shock absorber. *Adv Mat Res* 2013;641–642: 371–6.
- [124] Ma N, Yao Y, Wang Q, Niu C, Dong X. Properties and mechanical model of a stiffness tunable viscoelastic damper based on electrorheological elastomers.

- Smart Mater Struct 2020;29(4):045041.
- [125] Zhou X, Wang L, Huang D, Liang Y, Shi Q, Yaying H, et al. Smart table tennis racket with tunable stiffness for diverse play styles and unconventional technique training. *Adv Mater Technol* 2021;6(10):2100535.
- [126] Chou PC, Lin FP, Hsu HL, Chang CJ, Lu CH, Chen JK. Electrorheological sensor encapsulating microsphere media for plague diagnosis with rapid visualization. *ACS Sens* 2020;5(3):665–73.
- [127] Tao R. Electrorheology for efficient energy production and conservation. *J Intell Mater Syst Struct* 2011;22(15):1667–71.
- [128] Du E, Tang H, Huang K, Tao R. Reducing the viscosity of diesel fuel with electrorheological effect. *J Intell Mater Syst Struct* 2011;22(15):1713–6.
- [129] Huang Q, Li H, Zhuang Y, Ding Y, Ma C, Chen C, et al. Reducing viscosity of waxy crude oil with electric field perpendicular to oil's flow direction. *Fuel* 2021;283:119345.
- [130] Huang Q, Li H, Xie Y, Ding Y, Zhuang Y, Chen C, et al. Electrorheological behaviors of waxy crude oil gel. *J Rheol* 2021;65(2):103–12.
- [131] Li H, Li Z, Xie Y, Guo W, Huang Q, Chen C, et al. Impacts of shear and thermal histories on the stability of waxy crude oil flowability improvement by electric treatments. *J Petrol Sci Eng* 2021;204:108764.
- [132] Chen C, Zhang J, Xie Y, Huang Q, Ding Y, Zhuang Y, et al. An investigation to the mechanism of the electrorheological behaviors of waxy oils. *Chem Eng Sci* 2021;239:116646.
- [133] Tao R, Tang H, Tawhid-Al-Islam K, Du E, Kim J. Reply to Smith: electrorheological technology reduces the chocolate viscosity and fat level. *Proc Natl Acad Sci USA* 2016;113(36):e5255–6.
- [134] Zhong C, Deng Y, Hu W, Qiao J, Zhang L, Zhang J. A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors. *Chem Soc Rev* 2015;44(21):7484–539.
- [135] Ma Q, Zhang H, Zhou C, Zheng L, Cheng P, Nie J, et al. Single lithium-ion conducting polymer electrolytes based on a super-delocalized polyanion. *Angew Chem Int Ed* 2016;55(7):2521–5.
- [136] Zhu B, Jin Y, Hu X, Zheng Q, Zhang S, Wang Q, et al. Thin film as a stable interfacial layer for high-performance lithium-metal battery anodes. *Adv Mater* 2017;29(2):1603755.